

Modelação Dinâmica de um Processo de Infusão a Vácuo

Fernando Daniel Ribeiro da Silva

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Professor Doutor Fernando Gomes de Almeida

Doutor Luís Pina



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Junho de 2016

RESUMO

A presente dissertação enquadra-se num projeto de investigação mais alargado, que visa o desenvolvimento de metodologias de simulação e controlo automático, utilizando um sistema de visão artificial, para implementação em processos de infusão a vácuo.

Atualmente, os processos de infusão a vácuo apresentam, na generalidade das suas aplicações, uma estrutura de controlo em malha aberta; e mesmo nos casos em que existe realimentação de informação, o propósito é controlar a direção do fluxo de resina e não outras variáveis de igual importância como a velocidade do fluxo de resina. A modelação dinâmica do processo é então indispensável porque, por um lado, possibilita o planeamento e a otimização das várias etapas inerentes a uma infusão a vácuo (simulações numéricas) e, pelo outro, é indispensável para a obtenção de controladores adequados.

Neste trabalho estão incluídas todas as etapas da implementação de um sistema laboratorial para a execução do estudo experimental das infusões a vácuo, desde a sua construção até à obtenção dos modelos dinâmicos relativos aos vários sensores e atuadores que o integram. Este sistema é dotado de uma série de capacidades necessárias ao estudo da dinâmica do processo, nomeadamente, o subsistema de visão artificial, a aquisição dos valores de pressões, o subsistema de elevação dos reservatórios de resina, o subsistema de inclinação da mesa de infusão, a aquisição das condições atmosféricas e, por fim, o computador central, responsável pelo controlo de todos os subsistemas.

Para a modelação do processo são realizados vários testes experimentais, cujo procedimento de execução depende do tipo de dinâmica a estudar. Sempre que possível é utilizada a informação disponível na literatura; no entanto existem casos em que esta não existe ou não é aplicável, procedendo-se a uma conceptualização analítica dos processos em estudo. A modelação é executada de forma sequencial, sendo realizada no final de cada etapa uma validação do modelo dinâmico com dados experimentais.

Dynamic Modeling of a Vacuum Infusion Process

ABSTRACT

This work is part of a wider research project, which aims at the development of simulation and automatic control methods, performed with an artificial vision system, for implementation in vacuum infusion processes. Currently, industrial vacuum infusion process are based on open loop control structures and, even in cases where feedback is used, the purpose is simply to control the direction of resin flow. The velocity of resin flow and many other process variables are relevant but usually ignored. The dynamic modelling process is very important because it allows the planning and optimization of the various stages inherent to a vacuum infusion (numerical simulations) and on the other hand, is essential for the development of appropriate controllers.

The project includes all steps from the construction of the laboratory system, to obtaining dynamic models for the various system components. The testing system is equipped with a number of sensors and actuators required for the study of the dynamic process, namely, the artificial vision system, the pressure measurement system, the lifter of the resin reservoir, the infusion table inclination system, the acquisition of the weather conditions and, finally, the central computer responsible for coordinating all subsystems.

The system modelling included various experimental tests, and the model implementation process greatly depends on the dynamics to be studied. Whenever possible, the literature information is implemented however, there are cases where it's not applicable, requiring an analytical conceptualization of the processes in study. The modelling is performed sequentially, and a validation of the dynamic model with experimental data, is performed at the end of each stage.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Professor Fernando Gomes de Almeida e ao Doutor Luís Pina, por me inculcirem todo o conhecimento necessário para acabar esta etapa com o sentimento de satisfação pelo trabalho realizado.

Ao Massoud, pelo apoio prestado no decorrer do projeto.

A todos os colegas que conheci no INEGI.

Aos amigos que sempre me acompanham.

À minha família.

E à Joana pelo apoio incondicional.

Obrigado.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

RESUMO	III
ABSTRACT	V
AGRADECIMENTOS	VII
ÍNDICE DE CONTEÚDOS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	1
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
1.3 MATERIAIS COMPÓSITOS E PROCESSOS DE FABRICO	4
1.3.1 Materiais Compósitos	4
1.3.2 Processos de Fabrico	7
1.4 PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO	9
1.4.1 Elementos Integrantes do Sistema	9
1.4.2 Descrição Global do Processo	9
1.4.3 Procedimento Experimental Típico	10
1.4.4 Vantagens e Desvantagens	11
1.4.5 Fatores de Utilização	12
2. ANÁLISE DO PROJETO	15
2.1 INSTITUIÇÃO EMPRESARIAL PROMOTORA	15
2.2 MOTIVAÇÕES DO PROJETO	16
2.3 DESCRIÇÃO E OBJETIVOS	16
2.4 PLANEAMENTO DE TAREFAS	16
2.5 MERCADOS E SETORES DE APLICAÇÃO	17
3. ESTADO DA ARTE	19
3.1 MODELAÇÃO PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO	19
3.1.1 Escoaamento	19
3.1.2 Permeabilidade	20
3.1.3 Compactação do Meio Fibroso	22
3.1.4 Químio-Reologia	24
3.1.5 Acoplamento dos Modelos	25
3.1.6 Função de Aproximação do Campo de Pressões	28
3.1.7 Outros Fenómenos Agregados	29
3.1.8 Síntese da Modelação	31
3.2 INCERTEZAS NO PROCESSO VIP	32
3.2.1 Variação Interna dos Reforços	32
3.2.2 Incertezas Derivadas do Pre-Forming	32
3.2.3 Incertezas Durante a Infusão	33
3.2.4 Incertezas na Cura	33
3.2.5 Síntese das Incertezas nos Processos VIP	34
3.3 CONTROLO DE PROCESSOS DE INFUSÃO A VÁCUO	35
3.3.1 Controlo Passivo	35
3.3.2 Controlo Ativo	35
4. SISTEMA LABORATORIAL DE INFUSÃO A VÁCUO	39
4.1 REQUISITOS	39
4.2 PROJETO ESTRUTURAL	39
4.3 INSTRUMENTAÇÃO	40
4.3.1 Descrição Geral	40
4.3.2 Sistema de Inclinação da Mesa e Elevação dos Reservatórios	40
4.3.3 Válvulas de Controlo de Caudal	41

4.3.4	Sistema de Aquisição das Condições Atmosféricas	42
4.3.5	Sistema de Medição do Diferencial de Pressão.....	42
4.4	SISTEMA DE VISÃO ARTIFICIAL.....	43
4.4.1	Configuração do Sistema Físico	43
4.4.2	Deteção da Frente de Fluxo	44
4.4.3	Propriedades Gerais de Deteção	46
4.5	INTERFACE GRÁFICA.....	46
4.6	SÍNTESE DO SISTEMA SLIV	47
5.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	49
5.1	COMPONENTES USADOS	49
5.2	CONFIGURAÇÕES ADOTADAS	50
5.3	PROCESSO DE PREPARAÇÃO.....	52
6.	MODELAÇÃO DINÂMICA.....	53
6.1	INTRODUÇÃO	53
6.1.1	A Modelação.....	53
6.1.2	Estratégias de Modelação	53
6.2	MODELAÇÃO DA INFUSÃO A VÁCUO COM PRESSÃO DE ENTRADA CONSTANTE	55
6.2.1	Estrutura do Processo de Modelação	55
6.2.2	Desenvolvimento Analítico.....	55
6.2.3	Aquisição de Dados e Estimação de Parâmetros	56
6.2.4	Variação do Parâmetro das Propriedades do Escoamento.....	57
6.2.4.1	Variação durante a infusão.....	57
6.2.4.2	Variação entre testes experimentais	58
6.2.5	Influência do campo de pressões não linear	60
6.2.6	Simulação.....	60
6.2.7	Validação e Conclusão	61
6.3	MODELAÇÃO DA INFUSÃO A VÁCUO COM PRESSÃO DE ENTRADA VARIÁVEL.....	63
6.3.1	Estrutura do Processo de Modelação	63
6.3.2	Análise Introdutória	64
6.3.2.1	Primeiro Teste Experimental	64
6.3.2.2	Limite Experimental da Pressão de Entrada	64
6.3.2.3	Abordagem Inicial à Modelação Analítica	65
6.3.3	Modelação do Escoamento Unidirecional [Lei de Darcy].....	67
6.3.3.1	Descrição	67
6.3.3.2	Modelo com Campo de Pressões Linear.....	67
6.3.3.3	Modelo com Campo de Pressões Linear + Pressão de Entrada Virtual.....	68
6.3.3.4	Modelo com Campo de Pressões Linear + Pressão Capilar	69
6.3.3.5	Modelo com Campo de Pressões Não Linear + Pressão Capilar	70
6.3.3.6	Comparação e Discussão de Resultados	74
6.3.4	Modelação da Pressão de Entrada [Atuação da Válvula].....	76
6.3.4.1	Descrição	76
6.3.4.2	Modelação com a Válvula Fechada [Dependente do Tempo]	76
6.3.4.3	Modelação com a Válvula Fechada [Independente do Tempo]	79
6.3.4.4	Modelação com a Válvula Aberta	80
6.3.4.5	Diagrama Síntese do Modelo da Pressão à Entrada da Infusão.....	81
6.3.5	Modelação da Pressão à Entrada das Válvulas [Sistemas Auxiliares]	81
6.3.5.1	Modelação do Sistema de Elevação	81
6.3.5.2	Modelação do Sistema de Inclinação	82
6.3.6	Modelo Global de Infusão Com Pressão de Entrada Variável	85
6.3.8	Validação e Análise	87
7.	CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Vista raio X do Chevrolet Corvette 1953 (Pollock, s.d.).....	1
Figura 2 – Compósito processado (Pascini, s.d.).....	4
Figura 3 - Classificação dos compósitos (Moreira, 2009)	5
Figura 4 – Exemplos de disposição das fibras; Lado esquerdo: Tecido de fibras de vidro; Lado direito: Manta de fibras de vidro (aleatória) (Pascini, s.d. ; Silva, 2012)	6
Figura 5 – Métodos de infusão (ACMA, 2009).....	7
Figura 6 – Processo RTM (Alms, 2010).....	7
Figura 7 – Processo VA-RTM (Alms, 2010).....	8
Figura 8 - Processo SCRIMP (Alms, 2010)	8
Figura 9 – Esquema completo de um sistema VA-RTM (Carbonbydesign, s.d.).....	9
Figura 10 - Processo VIP: (a) configuração VIP; (b) tecido em fibra de vidro, película (<i>peel ply</i>), camada de distribuição e saco de vácuo (de baixo para cima); (c) fita-cola com duas faces, vedação das torneiras, tubos de resina e tubos helicoidais (de cima para baixo); (d) evolução do processo de infusão. (Heider, 2012)	10
Figura 11 – Moldagem aberta vs fechada (Gardiner, 2012)	12
Figura 12- Evolução da infusão a vácuo na produção de pás para aerogeradores (Gardiner, 2012)	12
Figura 13 – Custo unitário das pás – baseado em 1400 produtos produzidos por ano (PPA) (Schubel, 2012)	13
Figura 14 – Comparação dos custos unitários do VIP e LRTM (J.R. Hutchinson, 2011)	13
Figura 15 – INEGI (INEGI, 2011)	15
Figura 16 – Estrutura de controlo em malha fechada	16
Figura 17 – Amostra de tecido de fibra com linhas de fluxo no meio fibroso (Lomov, 2014).....	20
Figura 18 – Padrão elíptico de um fluido que se escoia através de um reforço fibroso (Verneta e Ruiza, 2014)...	21
Figura 19 – Escoamento unidirecional (George, 2011).....	21
Figura 20 – Escoamento radial (George, 2011).....	22
Figura 21 – Gradientes de pressão na resina e no reforço. Baseado em (Correia, 2004).....	22
Figura 22 - Aproximação polinomial de segunda ordem. Baseado em (Correia, 2004).....	28
Figura 23 – Variação de ‘ <i>a</i> ’ em função de P_e e P_v , para $v_{f0} = 0.1$ (superfície de baixo) e $v_{f0} = 0.25$ (superfície de cima). Baseado em (Correia, 2004)	28
Figura 24 – Ciclos de compactação/ descompactação. Baseado em (Correia 2004)	30
Figura 25 – Diagrama de interdependência dos modelos existentes. Baseado em (Song, 2003)	31
Figura 26 – Desalinhamento das fibras (T.S. Mesogitis, 2013).....	32
Figura 27 – Esquematisação das incertezas nos processos de fabrico de compósitos (T.S. Mesogitis, 2013)	34
Figura 28 – Controlo em malha aberta	35
Figura 29 – Controlo em malha fechada	36
Figura 30 – Exemplo de aplicação do controlo em malha fechada; Lado esquerdo: sem controlo; Lado direito: com controlo (Alms <i>et al</i> , 2011)	36
Figura 31 – Processo automatizado com sistema de controlo visual (Bickerton, et al. 2001)	37
Figura 32 – Projeto SLIV. Baseado em (Oliveira, Pina e Silva, 2015)	39
Figura 33 – Bomba de vácuo variável	40
Figura 34 – Sistema de controlo da altura e inclinação (Silva, Oliveira e Pina, 2016).....	40

Figura 35 – Válvulas de controlo de caudal e caixa de controlo (Silva, Oliveira e Pina, 2016)	41
Figura 36 – Sistema de segurança para controlo de força (Silva, Oliveira e Pina, 2016)	41
Figura 37 – Sistema de aquisição das condições atmosféricas. Baseado em (Silva, Oliveira e Pina, 2016).....	42
Figura 38 – Sistema de medição do diferencial de pressão (Silva, Oliveira e Pina, 2016)	42
Figura 39 – Primeira Infusão (Silva, Oliveira e Pina, 2016).....	43
Figura 40 – Detecção da frente de fluxo. Cima: sem corante; Meio: com óxido de ferro; Baixo: com corante alimentar.	43
Figura 41 – Infusão de resina com corante preto (Silva, Oliveira e Pina, 2016).....	43
Figura 42 – Procedimento de obtenção dos parâmetros de afinação da câmara	44
Figura 43 – Mapa 3D das posições e orientações da placa relativamente à câmara	44
Figura 44 – Janela de deteção (Silva, Oliveira e Pina, 2016)	44
Figura 45 – <i>Checkerboard</i> para deteção do ângulo da mesa	45
Figura 46 – Transformação em escala de cinzentos.....	45
Figura 47 – Transformação em imagem binária. Esquerda: ROI; Centro e Direita: imagem em formato binário	45
Figura 48 – Detecção da frente de fluxo.....	45
Figura 49 - Interface gráfica (Silva, Oliveira e Pina, 2016).....	46
Figura 50 – Intercomunicação entre os diversos subsistemas do SLIV	47
Figura 51 - Fibra de vidro com disposição aleatória.....	50
Figura 52 – Bolsa de resina.....	51
Figura 53 – Manga de infusão. Lado esquerdo: exterior. Lado direito: interior	51
Figura 54 – Reservatório de resina com sistema para aplicação de vácuo.....	51
Figura 55 – Processo de preparação da infusão	52
Figura 56 – Diagrama de modelação da infusão continua	55
Figura 57 – Diagrama de blocos de simulação de uma infusão contínua	61
Figura 58 - Diagrama de modelação da infusão não contínua	63
Figura 59 – Esquema do processo para iniciação da modelação do processo	65
Figura 60 – Diagrama de blocos do modelo obtido	66
Figura 61 – Etapas de modelação para obtenção do modelo em estudo	66
Figura 62 - Processo de verificação da lei de <i>Darcy</i>	67
Figura 63 – Diagrama de blocos do processo com o modelo de pressões virtuais	68
Figura 64 – Diagrama de blocos do processo com o fator de correção de correção na lei de <i>Darcy</i>	69
Figura 65 – Processo de obtenção do parâmetro Cr e do coeficiente ac	71
Figura 66 – Variação da espessura ao longo da resina.....	79
Figura 67 – Diagrama de blocos do modelo de pressão à entrada da infusão	81
Figura 68 – Representação da altura do reservatório da resina.....	81
Figura 69 – Diagrama de blocos do sistema de elevação dos reservatórios.....	82
Figura 70 – Representação do sistema de inclinação da mesa de infusão	82
Figura 71 – Diagrama de blocos do sistema de inclinação da mesa	83
Figura 72 – Diagrama do modelo global de uma infusão não contínua.....	85
Figura 73 – Diagrama de blocos do sistema de inclinação da mesa	86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Matrizes e reforços correspondentes (Moreira, 2009; Silva, 2012)	4
Tabela 2 - Requisitos para os materiais da matriz (Moreira, 2009; Silva, 2012).....	5
Tabela 3 – Qualidade das propriedades das fibras de reforço (Nasseh, 2007)	6
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens do processo VA-RTM (Beckwith, 2007; Heider, 2012)	11
Tabela 5 – Planeamento de tarefas	16
Tabela 6 - Medições de permeabilidade para dois tecidos não ondulados de fibra de vidro (T.S. Mesogitis, 2013)	33
Tabela 7 – Componentes eletrónicos e função (Bickerton, et al. 2001)	37
Tabela 8 – Propriedades de deteção do sistema de visão artificial (Silva, Oliveira e Pina, 2016).....	46
Tabela 9 – Componentes de infusão e respetiva função	49
Tabela 10 – Comparação dos modelos propostos para implementação da lei de <i>Darcy</i>	74
Tabela 11 – Erro quadrático médio (EQM)	75

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Evolução do erro para $P_c = -5\text{kPa}$	30
Gráfico 2 – Aproximação Darcyana e dados experimentais da frente de fluxo em função do tempo de infusão ..	56
Gráfico 3 – Variação do parâmetro das propriedades de escoamento C ao longo da infusão	58
Gráfico 4 – Variação máxima do parâmetro C no decorrer da infusão	58
Gráfico 5 – Parâmetro C quando válvula aberta.....	59
Gráfico 6 – Variação do parâmetro C das propriedades do escoamento	59
Gráfico 7 – Erro cometido não considerando o parâmetro ‘a’	60
Gráfico 8 – Validação do modelo de infusão contínua considerando a posição da frente de fluxo.....	61
Gráfico 9 – Validação do modelo de infusão contínua considerando a velocidade da frente de fluxo.....	62
Gráfico 10 – Velocidade máxima atingível em cada posição da frente de fluxo	62
Gráfico 11 – Primeiro teste experimental com abertura/fecho da válvula.....	64
Gráfico 12 - Teste experimental para obtenção da pressão capilar quando $dx/dt \approx 0$	64
Gráfico 13 - Primeiro teste com abertura/fecho das válvulas	67
Gráfico 14 – Pressão Real vs Pressão virtual durante o fecho da válvula	68
Gráfico 15 – Evolução real e estimada da frente de fluxo ($C \approx 0.55$)	69
Gráfico 16 – Diferencial de pressões virtuais vs diferencial de pressões real	69
Gráfico 17 – Evolução real da frente de fluxo e respetivas simulações	70
Gráfico 18 - Conjunto das aproximações exponenciais do parâmetro ac dos 4 ensaios	72
Gráfico 19 - Aproximação exponencial do coeficiente ac da infusão 5.....	72
Gráfico 20 – Evolução real vs simulação do modelo com campo de pressões não linear e pressão capilar	74
Gráfico 21 – Comparação dos modelos propostos para correção da lei de <i>Darcy</i>	75
Gráfico 22 – Estimação do coeficiente de proporcionalidade global em função da posição da frente de fluxo	78
Gráfico 23 – Simulação da pressão de entrada quando a válvula é fechada.....	78

Gráfico 24 – Simulação do modelo de pressões independente do tempo	80
Gráfico 25 – Variação da pressão com a altura do reservatório.....	82
Gráfico 26 – Variação da pressão em função da inclinação da mesa de inclinação	83
Gráfico 27 - Simulação do modelo da pressão à entrada da infusão (velocidade).....	87
Gráfico 28 - Simulação do modelo da pressão à entrada da infusão (posição da frente de fluxo).....	87

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

Ao longo da história, os seres humanos têm vindo a usar materiais compósitos nas mais diversas áreas de aplicação. Uma das mais antigas ocorreu aquando da existência dos antigos Mesopotâmicos, 3400 (a.C.), com a utilização de madeira colada em diferentes ângulos, de forma a criar o que chamamos hoje de contraplacado. Também os Egípcios recorreram à ideia de material compósito, para criar a *Cartonnage* - camadas de linho ou papiro embebidas em gesso - utilizada em máscaras mortuárias datadas entre 2181-2055 (a.C.). Além disso, arqueólogos têm vindo a descobrir, recorrentemente, reforços de palha embutidos em tijolos de barro, cerâmicas e barcos de 1500 (a.C.) (Azevedo & Campos, 2007; Navarro, 2006; *History of Composites*, 2015).

No final do século XII (d.C.) os mongóis inventaram os primeiros arcos em material compósito, feitos com uma combinação de madeira, bambu, ossos, tendões de gado, chifres e seda, colados com resina de pinheiro natural. Os arcos eram pequenos, muito poderosos e extremamente precisos, características que os tornaram nas armas mais temidas até à invenção das eficazes armas de fogo do século XIV (*History of Composites*, 2015).

É de salientar que a era moderna dos materiais compósitos está intrinsecamente relacionada com o desenvolvimento dos polímeros sintéticos, e foi no início, que foram desenvolvidos plásticos como o vinil, o poliestireno e o poliéster. Apesar deste progresso, os plásticos por si só não apresentam propriedades mecânicas suficientemente atrativas para a sua implementação em massa na indústria. No entanto, houve uma resina que foi amplamente utilizada e é considerada por muitos como o primeiro plástico sintético do mundo, a baquelite (*History of Composites*, 2015).

Os anos trinta representam uma das décadas mais importantes para a indústria dos compósitos. Em 1935 Owens Corning lançou o primeiro plástico reforçado com fibras de vidro (FRP), em 1936 as resinas de poliéster insaturadas foram patenteadas e, devido às suas propriedades de cura, viriam a tornar-se a escolha dominante na indústria atual (*History of Composites*, 2015).

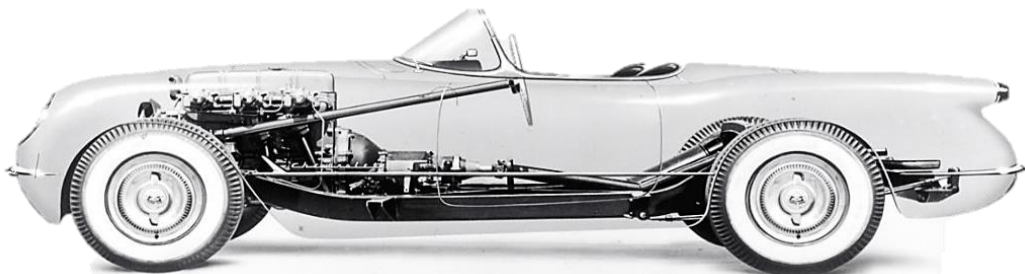


Figura 1 – Vista raio X do Chevrolet Corvette 1953 (Pollock, s.d.)

Muitos dos avanços na área dos compósitos foram impulsionados pelo ambiente de guerra e foi precisamente a Segunda Guerra Mundial que transportou a indústria dos FRP do laboratório para a produção real. Inicialmente a sua utilização foi direcionada ao fabrico de componentes para aviões militares e, quando se descobriu que era “transparente” às frequências de rádio, o material foi rapidamente adaptado para uso em equipamentos de radar (Scala, 1996;

History of Composites, 2015). Pouco tempo depois, em 1947, foi possível construir e testar o primeiro automóvel com um corpo totalmente compósito, o que levou ao desenvolvimento do primeiro *Corvette* em 1953, Figura 1. O processo de fabrico utilizado era essencialmente por moldagem manual, *hand-lay-up*, caracterizado pelo uso de mantas em fibra de vidro, impregnadas com resina, e que são posteriormente colocadas sobre moldes ferramenta para adquirir a forma desejada (*History of Composites*, 2015; Lubin, 2013).

Durante este período, foram desenvolvidos vários métodos para moldagem de materiais compósitos, sendo o *compression molding of sheet molding compound* (SMC) e o *bulk molding compound* (BMC), os processos de fabrico que emergiriam de forma dominante na indústria automóvel (*History of Composites*, 2015; Johnson, 2015). Em 1946 a Marinha norte americana utiliza pela primeira vez, ainda que de forma pouco controlada, um processo *Resin Transfer Molding* (RTM) e, logo de seguida, Brandt Goldsworthy desenvolve a pultrusão (Potter May, 1999). O enrolamento filamentar é também implementado e torna-se no suporte do processo de fabrico dos motores para os foguetões espaciais, que impulsionaram a exploração do espaço (*History of Composites*, 2015).

Nas décadas de 60 e 70 a indústria dos compósitos começou a entrar na fase de maturidade, desenvolvendo resinas de cadeia sintética e fibras de reforço cada vez mais variadas e melhores do ponto de vista mecânico (Boisse, 2015). A fibra de carbono foi patenteada em 1961 e o Kevlar¹ não tardou a ser lançado pela *DuPont* (Johnson, 2015). Neste período, o mercado automóvel ultrapassou o mercado da produção direcionado à marinha e tornou-se no consumidor número um desde então (*History of Composites*, 2015).

A partir da década de 90, a oferta de soluções na área dos compósitos começa a ser vasta e já se verifica uma certa concorrência entre os compósitos e os materiais tradicionais em determinadas áreas da engenharia. Entre os diversos tipos existentes, já se encontram implementados na indústria os seguintes processos de moldagem (Silva, 2012): enrolamento filamentar (*filament winding*), rotomoldagem, moldagem manual (*hand-lay-up*), centrifugação, *Resin Transfer Molding* (RTM), infusão a vácuo, compressão a quente (SMC) e a frio, pultrusão.

Relativamente ao processo RTM, devido aos custos envolvidos na construção dos moldes, ocorreu uma evolução para LRTM (RTM-Light ou ECO), que utiliza, de igual forma, um molde superior rígido, mas muito mais leve e com menos material que o utilizado em RTM. O inconveniente é que a resina não pode ser injetada sob pressão devido à falta de rigidez do molde superior. Por esse motivo, recorre-se à infusão a vácuo para a inserção da mesma.

A partir desse momento mais variações seriam desenvolvidas. Entre os processos mais relevantes encontram-se: o *Vaccum Molding*, o *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding* (VARTM), o *Seeman Composites Resin Infusion Molding Process* (SCRIMP) e o *Resin Infusion under Flexible Tooling* (RIFT). Embora alguns destes processos de moldagem apresentem elevadas semelhanças entre si, todos eles são dotados de características específicas, que se adaptam de forma individual aos requisitos da indústria atual.

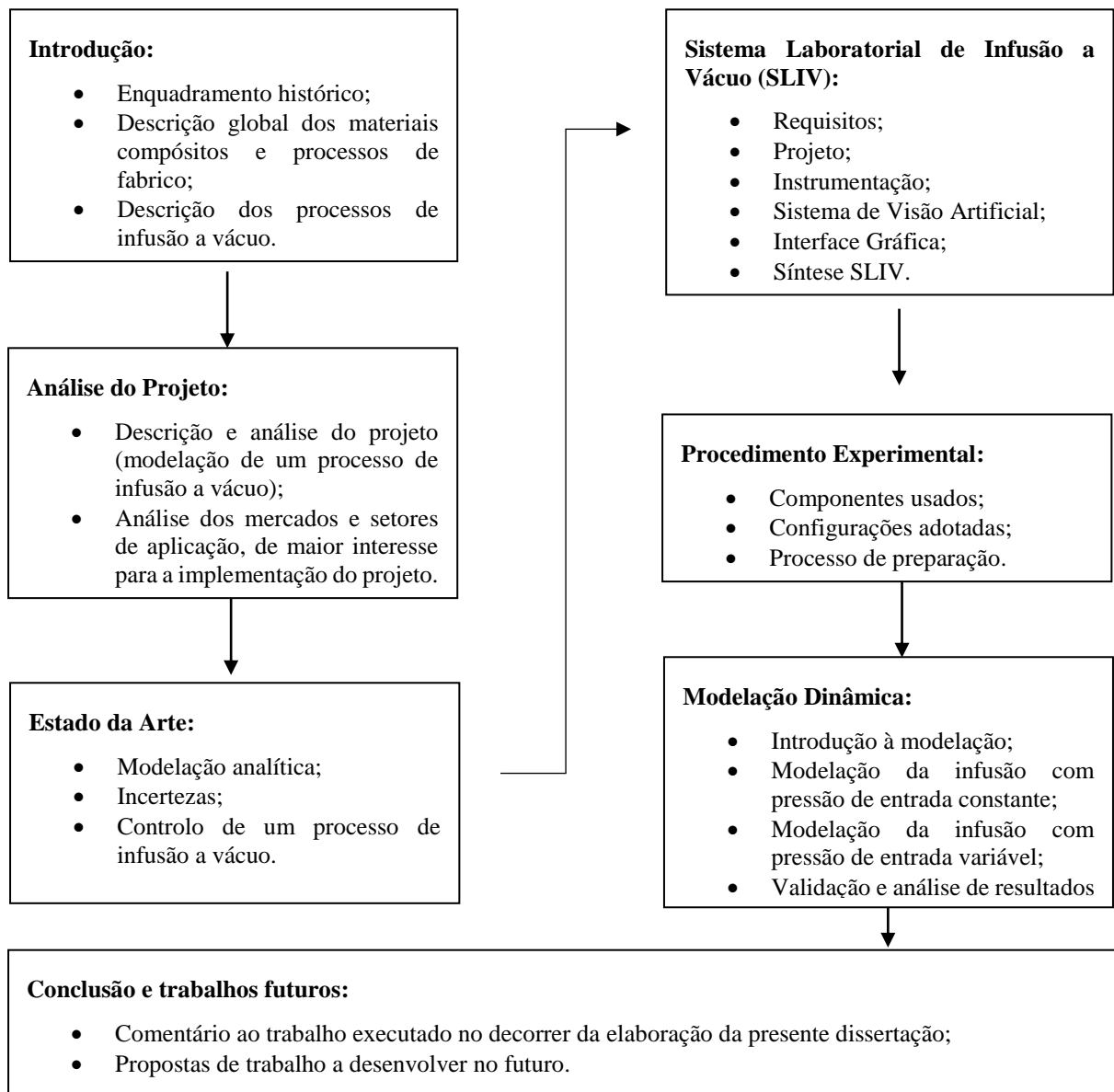
¹ Kevlar- Fibra de aramida

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação descreve um projeto de modelação de um processo de infusão a vácuo, na qual se subdividem os trabalhos nos seguintes grupos fundamentais de implementação: revisão bibliográfica (introdução + estado da arte), sistema laboratorial de infusão a vácuo (SLIV), modelação dinâmica, discussão de resultados e recomendações para trabalhos futuros.

A revisão bibliográfica, ao contrário dos restantes grupos, refere-se a uma mescla de informação proveniente da introdução e do estado da arte, ou seja, dois grupos distintos. A introdução inclui todos os assuntos que já são de conhecimento geral, de forma a que o leitor adquira um conhecimento genérico das temáticas, que não influenciam diretamente o objetivo da dissertação. Relativamente ao estado da arte, contém toda a informação que, de alguma forma, se apresenta como pertinente para a execução dos trabalhos a realizar. Definiu-se que este último será apresentado após uma análise do projeto, portanto, a introdução e o estado da arte não são consecutivos.

De seguida apresenta-se um esquema síntese da estrutura da dissertação:



1.3 MATERIAIS COMPÓSITOS E PROCESSOS DE FABRICO

O conhecimento sólido dos fundamentos teóricos e práticos relativos aos materiais compósitos e aos processos que lhes estão subjacentes, é crucial para o estudo adequado da modelação dinâmica e controlabilidade de um sistema desta natureza.

De seguida será feita uma apresentação global sobre tais assuntos, sendo que no tópico referente aos processos será explorada de forma mais aprofundada a informação relacionada com os processos de infusão a vácuo.

1.3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

• Descrição Geral

Os compósitos são constituídos por dois ou mais materiais, com propriedades químicas e físicas distintas, em que um deles garante a ligação (matriz) e os outros funcionam como reforço, Figura 2, obtendo-se propriedades muito interessantes quando comparadas com a utilização de um único material (Pascini, s.d. ; Silva, 2012; Biron, 2013).

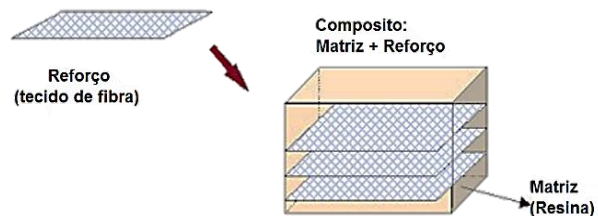


Figura 2 – Compósito processado (Pascini, s.d.)

Na Tabela 1 estão mencionadas as combinações geralmente utilizadas entre os materiais de matriz e de reforço. No entanto, o presente estudo direciona-se exclusivamente aos compósitos de matriz orgânica com reforço mineral ou orgânico.

Tabela 1 – Matrizes e reforços correspondentes (Moreira, 2009; Silva, 2012)

Matriz		Reforço	
Orgânica (PMC's– <i>Polymer Matrix Composites</i>)	Polímeros Termoplásticos	Mineral	• Fibra de vidro • Fibra de carbono
		Orgânico	• Aramida • Poliamida
	Polímeros Termoendurecíveis	Metálico	• Boro • Alumínio
Metálica (MMC's– <i>Metal Matrix Composites</i>)	Ligas leves de Alumínio, Magnésio, Titânio	Mineral	• Fibra de carbono • Carboneto de silício
		Metálico	• Boro
		Misto	• Boro revestido com carboneto de silício
Cerâmica (CMC's– <i>Ceramic Matrix Composites</i>)		Mineral	• Carboneto de silício
		Metálica	• Boro ou Tungsténio

• Classificação

O facto de os compósitos serem uma combinação de diferentes materiais implica que várias estratégias de fabrico sejam estabelecidas. A Figura 3 apresenta uma síntese de classificação dos compósitos, mostrando todas as possibilidades de fabrico.

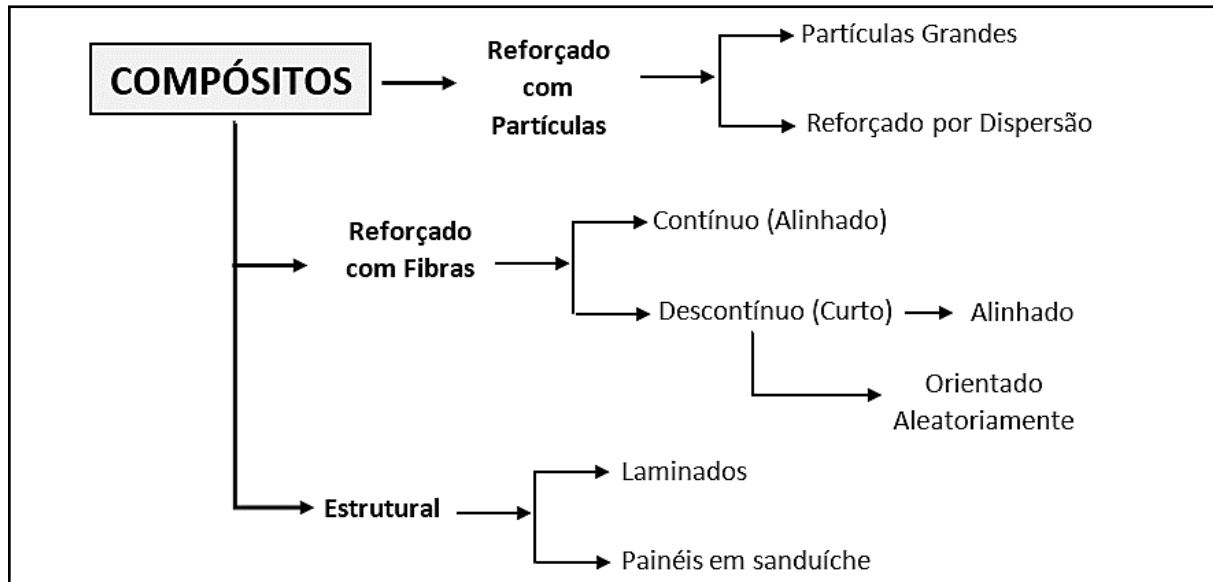


Figura 3 - Classificação dos compósitos (Moreira, 2009)

• Matriz

A matriz de um material compósito tem como finalidade distribuir o carregamento imposto ao material, manter a coesão das fibras, protegê-las do meio ambiente e impedir danos causados aquando da sua utilização. Os principais requisitos do material integrante da matriz apresentam-se na Tabela 2 (Silva, 2012).

Tabela 2 - Requisitos para os materiais da matriz (Moreira, 2009; Silva, 2012)

Propriedades	Características
Mecânicas	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à tração elevada • Ductilidade • Resistência ao corte • Tenacidade • Resistência ao impacto
Térmicas	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência a temperaturas extremas • Coeficiente de dilatação térmica (CDT) próximo do CDT da fibra • Baixa condutividade térmica
Químicas	<ul style="list-style-type: none"> • Boa adesão às fibras • Resistência à degradação em ambientes quimicamente agressivos • Baixa absorção de humidade
Outras Propriedades	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo • Solidificação ou cura rápidas

É de salientar que o material utilizado na matriz é muito importante, tendo em conta, que este é o elemento “ligante” das fibras e, consequentemente, responsável pela máxima temperatura de serviço do material (Silva, 2012).

• Reforço

O reforço é em geral mais resistente que a matriz e revela-se como principal responsável pela obtenção das propriedades finais desejadas para o compósito.

Geralmente são utilizadas fibras como reforço estrutural, o que permite ao material obter uma maior rigidez, estabilidade térmica e maior resistência na direção longitudinal das fibras (Silva, 2012), Figura 4.

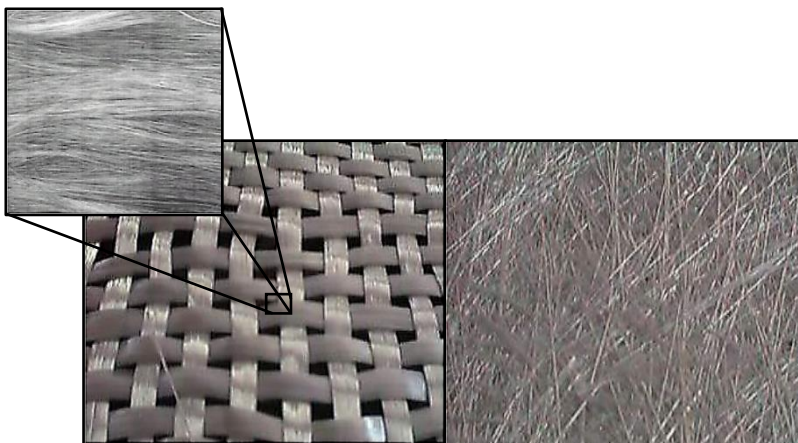


Figura 4 – Exemplos de disposição das fibras; Lado esquerdo: Tecido de fibras de vidro; Lado direito: Manta de fibras de vidro (aleatória) (Pascini, s.d. ; Silva, 2012)

Na Tabela 3 estão representadas características qualitativas, de diversas propriedades, relativas às fibras mais utilizadas na indústria.

Tabela 3 – Qualidade das propriedades das fibras de reforço (Nasseh, 2007)

Propriedade	Aramida	Carbono	Vidro
Alta resistência à tração	B	A	B
Módulo de Tração	B	A	C
Resistência à Compressão	C	A	B
Módulo de Compressão	B	A	C
Resistência à Flexão	C	A	B
Módulo de Flexão	B	A	C
Resistência ao Impacto	A	C	B
Resistência Interlaminar ao Corte	B	A	A
Resistência ao Corte	B	A	A
Densidade	A	B	C
Resistência à Fadiga	B	A	C
Resistência ao Fogo	A	C	A
Isolamento Térmico	A	C	B
Expansão Térmica	A	A	A
Custo	C	C	A

A = Excelente B = Aceitável C = Baixo

1.3.2 PROCESSOS DE FABRICO

Vários processos estão necessariamente vocacionados para a moldagem de materiais compósitos. Tal como já mencionado no enquadramento histórico, os mais usuais na indústria são:

- Enrolamento Filamentar (*filament winding*);
- Rotomoldagem;
- Moldagem manual (*hand-lay-up*);
- Centrifugação;
- RTM;
- Infusão a vácuo;
- Compressão a quente (SMC) e a frio;
- Pultrusão.

• Descrição Geral

A infusão a vácuo descreve-se como uma evolução do processo RTM e desde que se revelou como alternativa económica ao mesmo, tem vindo a sofrer várias transformações. Diz a história, que a primeira variante do RTM foi o RTM-*Light*, ou simplesmente LRTM, e só depois começaram a surgir as infusões com “moldes superiores” flexíveis (VIP² e CCBM³), Figura 5. Na linha dos VIP surgiram mais variantes, tais como, o VA-RTM e o SCRIMP (Alms, 2010), e, embora existam muitos outros, o estudo debruça-se essencialmente sobre estes.

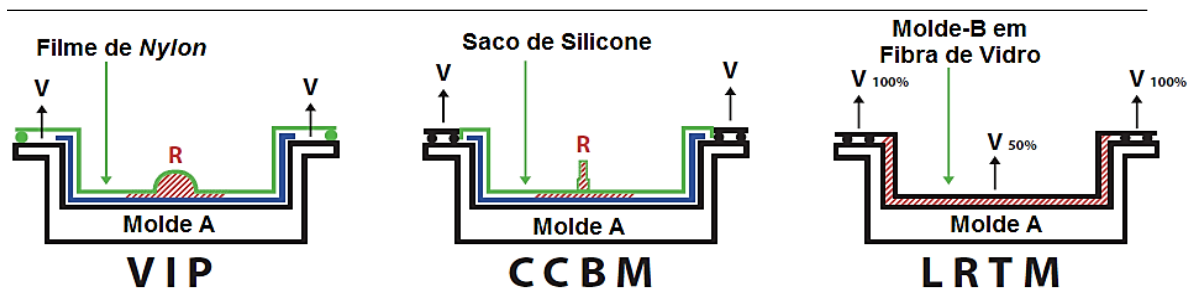


Figura 5 – Métodos de infusão (ACMA, 2009)

• RTM

A moldagem por RTM (*Resin Transfer Molding*) é caracterizada pelo uso de dois moldes robustos, que em contacto apresentam a forma final da peça a fabricar, Figura 6.

O processamento inicia-se com os moldes abertos, colocam-se os tecidos de fibra, fecha-se e injeta-se, sobre alta pressão, a resina no interior. Por

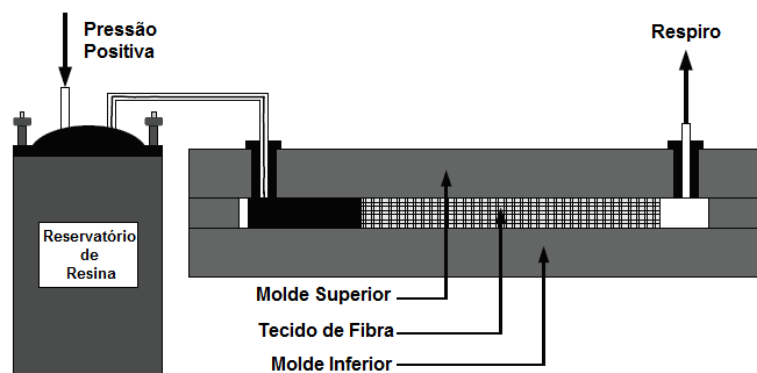


Figura 6 – Processo RTM (Alms, 2010)

² VIP - *Vacuum Infusion Process*

³ CCBM - *Closed Cavity Bag Molding*

vezes, também se aplica um *pre-form* à estrutura de fibra, de forma a facilitar a sua colocação (Alms, 2010; CompositesWorld, 2014).

● VA-RTM

O VA-RTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*) é um processo por infusão a vácuo, cujo objetivo é a transferência de resina pelo meio fibroso, por influência de um diferencial de pressões resultante de uma pressão de saída inferior à atmosférica, Figura 7. A combinação deste efeito, com o facto de a fronteira superior não ser rígida, leva a espessura a manter-se em valores mínimos (Alms, 2010).

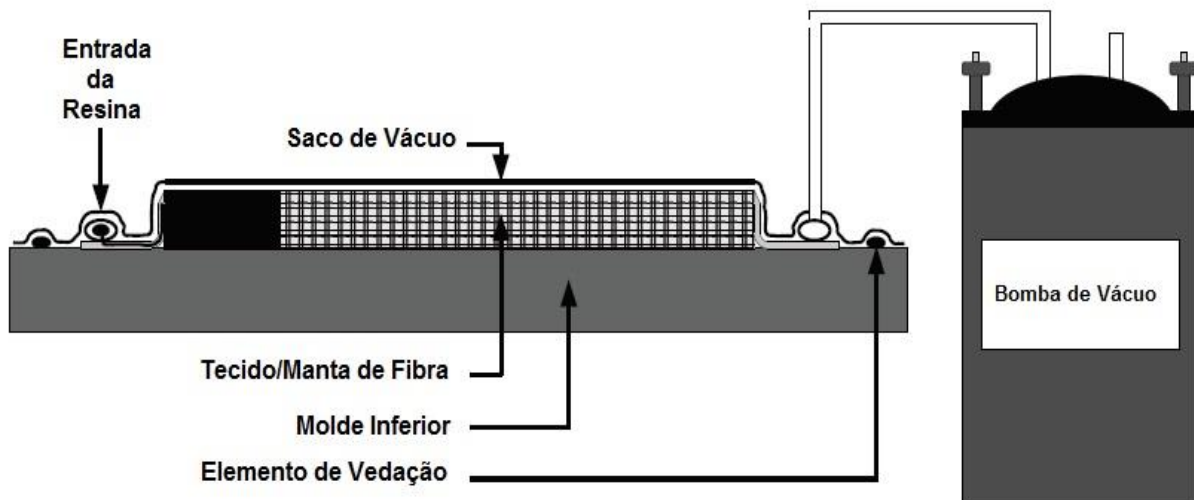


Figura 7 – Processo VA-RTM (Alms, 2010)

● SCRIMP

O processo SCRIMP é muito semelhante ao VA-RTM. A única diferença reside na colocação de uma camada de material altamente permeável, entre o topo do tecido de fibra e o saco de vácuo, que aumenta significativamente a velocidade de infusão da resina. Esta camada designa-se por “camada de distribuição” (Alms, 2010), Figura 8.

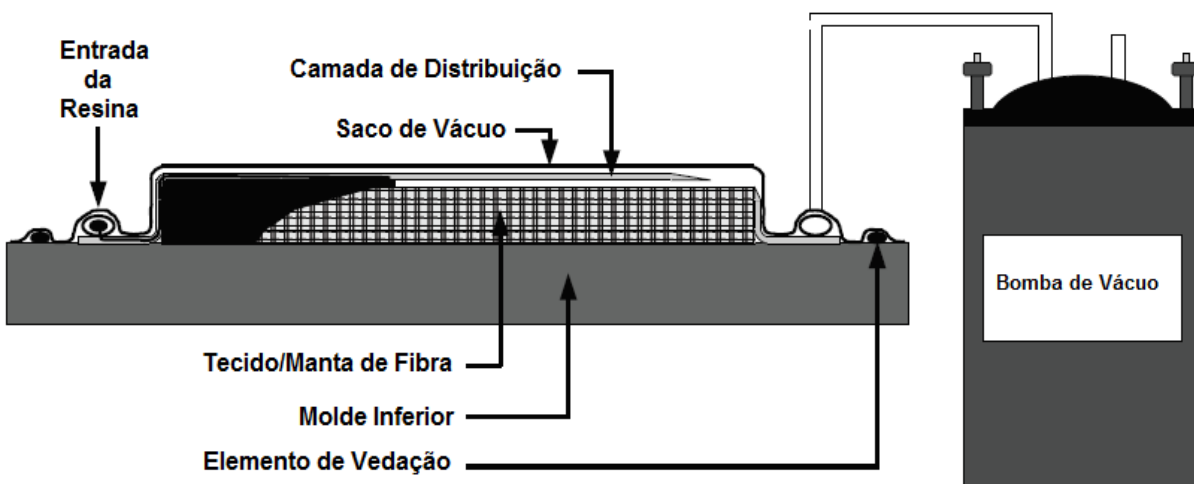


Figura 8 - Processo SCRIMP (Alms, 2010)

1.4 PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO

Os elementos característicos de um processo VIP (*Vacuum Infusion Process*), assim como todos os procedimentos que lhe estão subjacentes, são de elevada importância para a realização do presente projeto. Por esse motivo o seu estudo é aprofundado neste tópico, de forma a expor claramente a razão da sua emergente utilização industrial nos últimos anos.

Relembre-se que os processos VA-RTM e SCRIMP são ambos processos de infusão a vácuo (VIP); portanto, toda a análise proveniente do mesmo, também é aplicável nestas suas variantes.

1.4.1 ELEMENTOS INTEGRANTES DO SISTEMA

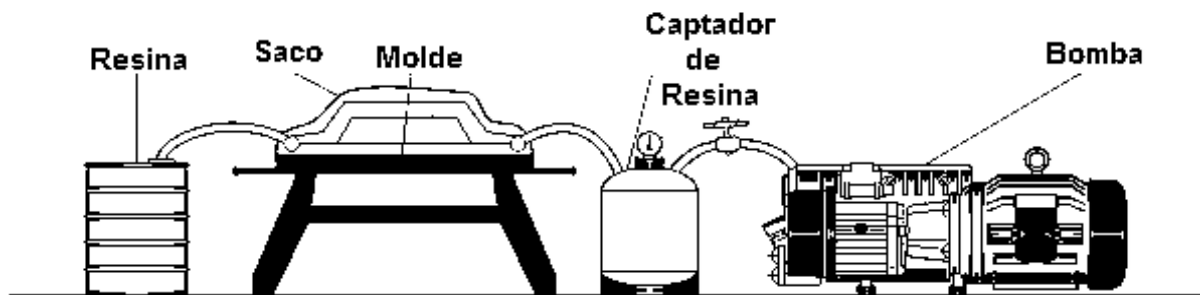


Figura 9 – Esquema completo de um sistema VA-RTM (Carbonbydesign, s.d.)

Os processos VIP caracterizam-se pela utilização de apenas uma superfície rígida, o molde inferior, e um saco, em filme flexível, para a execução da infusão a vácuo.

Inclui também um sistema que induz o fluxo de resina, nomeadamente, os canais de entrada para distribuição da mesma e uma bomba de vácuo, que retira o ar existente no interior do saco de forma a originar uma pressão negativa, Figura 9.

Por fim, e não menos importantes, temos os elementos de vedação (p.e. fita cola, “tape”) que impedem a entrada de ar no saco (ACMA, 2009; Potter *et al*, 1999).

1.4.2 DESCRIÇÃO GLOBAL DO PROCESSO

O processo basicamente refere-se à aplicação de vácuo, por um lado, que influencia a imposição do fluxo de resina, pelo outro.

Inicialmente a bomba é ligada e o ar começa a ser extraído do espaço compreendido entre o saco e o molde ferramenta. A pressão no interior do saco começa a baixar e no momento em que o diferencial de pressões, entre o interior e o exterior, vence as forças viscosas e inerciais da resina, o fluxo é iniciado. Após a impregnação total do tecido fibroso, o fluxo continua até um captador e nesse instante o processo é interrompido de forma a evitar que a bomba aspire resina (Heider, 2012), Figura 9.

Para finalizar, mantendo a peça ainda sob a compressão do vácuo, impõe-se um determinado tempo de espera, de forma, a que o processo de cura se conclua.

1.4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL TÍPICO

Após uma descrição geral de um processo VIP torna-se interessante enumerar um conjunto de etapas que, geralmente, se utilizam no decorrer de um processo deste tipo.

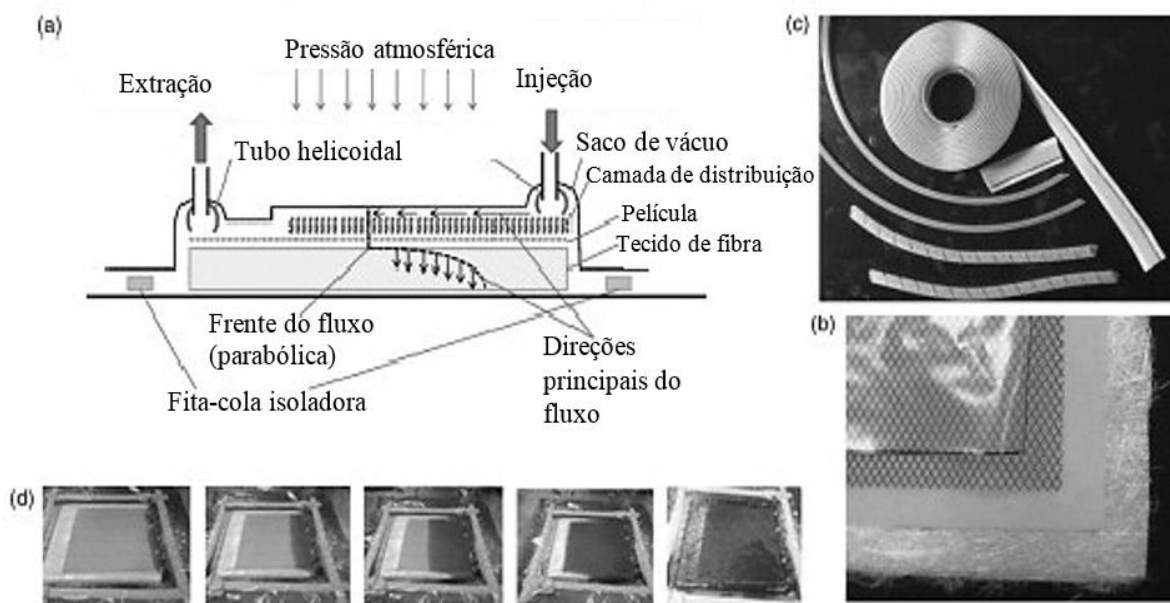


Figura 10 - Processo VIP: (a) configuração VIP; (b) tecido em fibra de vidro, película (*peel ply*), camada de distribuição e saco de vácuo (de baixo para cima); (c) fita-cola com duas faces, vedação das torneiras, tubos de resina e tubos helicoidais (de cima para baixo); (d) evolução do processo de infusão. (Heider, 2012)

O procedimento típico de um processo VIP inclui, Figura 10 (Heider, 2012):

- ❶ Limpar o molde e aplicar uma cera sobre a superfície para facilitar a desmoldagem.
- ❷ Colocar as fibras, se necessário várias camadas.
- ❸ Aplicar uma película (*peel ply*) de forma a cobrir todo o tecido de fibra.
- ❹ Colocar a camada que contém os distribuidores do caudal de resina. Esta pode ajudar a aumentar a velocidade de infusão e é comumente usada no fabrico de grandes peças de laminados compostos. O sistema de injeção da resina será conectado a esta camada, o que implica que esta não possa estar em contacto direto com o sistema de extração do ar.
- ❺ Inserir a porta de injeção da resina numa das extremidades da camada de distribuição. Um tubo helicoidal aberto (com forma de mola) ou um tubo em forma de ómega também podem ser usados como meio de injeção e distribuição da resina.
- ❻ Inserir a porta de descarga na parte superior do *peel ply*, enunciado na etapa 3. Convém relembrar que esta não pode ser colocada em contacto com o sistema de distribuição.
- ❼ Aplicar a fita-cola de duas faces, em torno do molde, para depois se proceder à vedação.
- ❽ Pousar cuidadosamente o saco de vácuo sobre o conjunto e verificar a colagem na fita-cola.
- ❾ Conectar os tubos de extração e injeção às portas homólogas. Conectá-los também à bomba e ao reservatório, respetivamente. Não encher ainda o reservatório.
- ❿ Fechar a porta de injeção e abrir a porta de extração para aplicar vácuo no interior do conjunto sob o saco. Verificar cuidadosamente e corrigir qualquer vazamento de ar.

- 11 Para comprimir o reforço de fibra, aplicar cargas de vácuo ciclicamente.
- 12 Encher o reservatório de resina. Manter a porta de vácuo ligada. Abrir a porta de injeção para permitir que o caudal de resina atravessasse o tecido de fibra.
- 13 Ocorrência de uma rápida distribuição de resina na parte superior e uma infusão gradual na direção vertical.
- 14 Uma vez que a resina atinge a porta de extração, permitir que a esta flua mais alguns minutos, de forma a eliminarem-se possíveis bolhas de ar existentes no interior da estrutura.
- 15 Fechar a porta de injeção e manter a porta de extração aberta, até que se finalize o processo de cura da resina. O vácuo irá manter o conjunto firmemente pressionado contra o molde e também irá manter a pressão de compressão uniforme. Esta prática resulta numa espessura globalmente homogénea.
- 16 Uma vez finalizada a cura da resina, pode-se desligar o vácuo e desmoldar.

NOTA: No procedimento descrito, a camada de distribuição da resina é um elemento característico do processo SCRIMP; no entanto, o autor identifica-o como sendo VA-RTM. Tal comprova a facilidade com se mesclam os pressupostos deste tipo de processos. Portanto, VIP é o termo mais apropriado devido à sua definição mais abrangente.

1.4.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS

Na Tabela 4 encontram-se enumeradas várias vantagens e inconvenientes que um processo VIP apresenta.

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens do processo VA-RTM (Beckwith, 2007; Heider, 2012)

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Bom controlo das tolerâncias dimensionais; • Qualidade de laminagem constante; • As superfícies podem ser revestidas a gel para acabamento melhorado; • Acabamento liso na superfície de contacto com o molde ferramenta; • Possibilidade de moldagens com reforços estruturais; • Infusões a baixa pressão; • Preço de prototipagem relativamente baixo; • Controlo das emissões de gases voláteis (Ex: estireno) devido à moldagem fechada; • Não são necessários níveis elevados de trabalho nem de habilitações para operar este processo; • Baixa limitação no <i>design</i> e na dimensão; • Boas propriedades mecânicas; • Razão entre quantidade de fibra e resina é muito elevada ($\approx 60\%$ fibra e $\approx 40\%$ resina); • Económico relativamente a outros processos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Projeto do molde fundamental para a qualidade da peça. • Os tempos de ciclo podem ser um pouco lentos; • Possibilidade de existência de interstícios na estrutura final do material; • Elevada flexibilidade estrutural devido à redução de quantidade de resina (em alguns casos pode ser uma vantagem); • Requer viscosidades baixas; • Possibilidade da não reutilização de alguns elementos usados; • Pressões de infusão baixas; • Preço dos materiais consumíveis.

1.4.5 FATORES DE UTILIZAÇÃO

É um facto que os processos VIP, assim como outros, têm evoluído tecnologicamente nos últimos anos, mas a questão que se coloca agora é saber se a sua integração na indústria acompanha essa evolução.

De seguida são apresentados dados concretos, relativos a essa integração da tecnologia durante a última década, segundo diferentes perspetivas, nomeadamente, a do ambiente, da saúde, da indústria, do custo e do controlo.

Perspetiva ambiental e segurança para a saúde

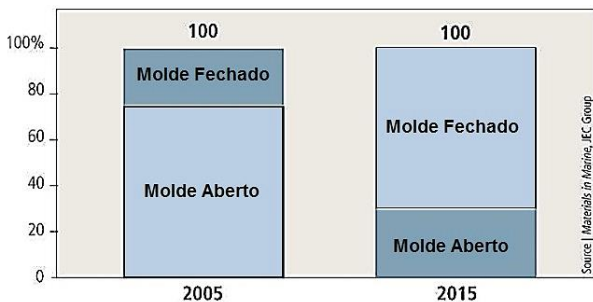


Figura 11 – Moldagem aberta vs fechada (Gardiner, 2012)

A preocupação com o impacto ambiental e com as medidas de segurança para a saúde impulsionou a transição dos processos em molde aberto para molde fechado. Desta forma, evita-se a libertação de substâncias potencialmente perigosas (estireno) para o ser humano (ACMA, 2009).

Essa situação é confirmada na Figura 11 em que se verifica claramente a mudança de paradigma desde 2005 até ao momento. Os processos de fabrico de compósitos em molde

fechado estão com uma forte aplicação e a tendência é mesmo para que tal continue.

Perspetiva industrial (aerogeradores)

Com a indústria dos compósitos em pleno progresso, tornou-se necessária uma expansão para áreas de aplicação em mercados alternativos, nomeadamente as energias renováveis.

O setor da energia eólica é de facto um bom exemplo no que diz respeito, à pressão que certas áreas de consumo exercem sobre o progresso de determinados produtos. As pás dos geradores, devido à dimensão que apresentam, estão constantemente a empurrar os limites e as perspetivas de evolução, tornando os processos de fabrico cada vez mais viáveis, tanto do ponto de vista económico, como tecnológico.

Na Figura 12 é possível verificar que, a par da evolução das pás dos aerogeradores, também a infusão está a ganhar vantagem relativamente a outros processos. Esta é uma questão essencialmente económica, mas representa de forma clara a tendência de utilização dos processos de infusão na indústria de produção.

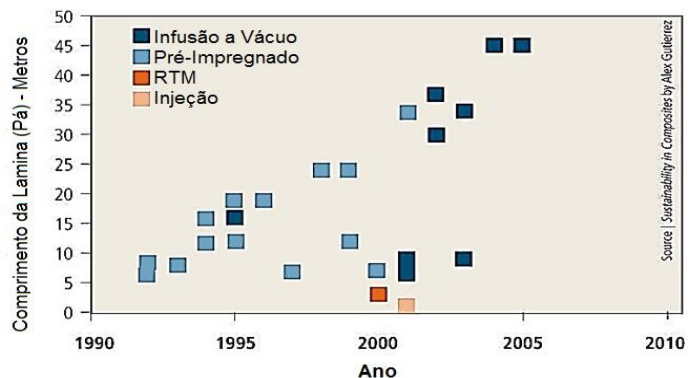


Figura 12- Evolução da infusão a vácuo na produção de pás para aerogeradores (Gardiner, 2012)

Perspetiva Financeira (aerogeradores)

Recorrendo mais uma vez ao exemplo dos aerogeradores e fazendo uma contabilização de todos os custos envolvidos, verifica-se que os processos mais económicos são o VIP (VA-RTM) e o LRTM, isto para uma produção anual de 1400 componentes, Figura 13. Se se fizer uma análise extensiva a qualquer volume de produção, entre estes dois processos verifica-se que, até um volume de produção de cerca de 250 unidades por ano, o processo VIP é claramente mais rentável comparativamente com o LRTM, Figura 14 (Schubel, 2012).

Embora este seja apenas um exemplo, torna-se claro que o processo de infusão a vácuo ainda não é uma alternativa efetiva em todo o espectro de produção. No entanto, acredita-se que uma evolução tecnológica pode retificar esta situação e impulsiona-lo para a primeira linha de produção de compósitos. Refira-se que a solução pode passar por um aumento da controlabilidade e diminuição dos desperdícios de resina recorrentes neste processo.

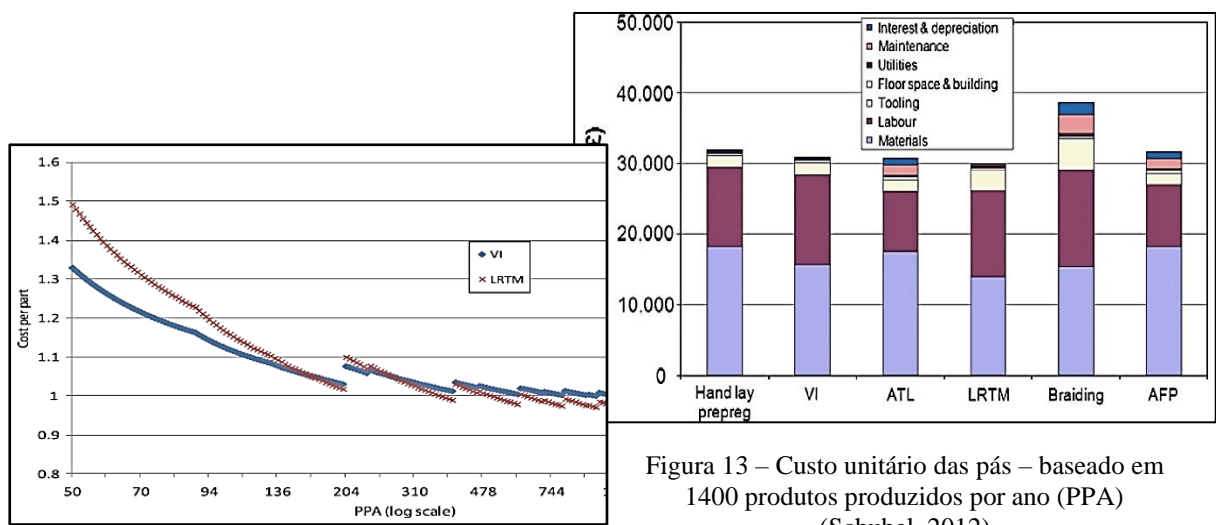


Figura 14 – Comparação dos custos unitários do VIP e LRTM (J.R. Hutchinson, 2011)

Figura 13 – Custo unitário das pás – baseado em 1400 produtos produzidos por ano (PPA) (Schubel, 2012)

Perspetiva do controlo

Neste momento existem soluções de controlo bastante viáveis para este tipo de moldagem, que realmente executam tudo aquilo que “prometem”. No entanto, quando a controlabilidade aumenta, as perspetivas de aplicação industrial também aumentam e é nesse sentido que a evolução deste processo se deve focar (objetivo do projeto no qual esta dissertação se insere).

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DO PROJETO

2.1 INSTITUIÇÃO EMPRESARIAL PROMOTORA



Figura 15 – INEGI (INEGI, 2011)

O Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI), instituição empresarial promotora do projeto em estudo, apresenta-se a nível nacional, como um elemento de referência no âmbito da Inovação de base Tecnológica e Transferência de Conhecimento e Tecnologia.

Globalmente, a instituição descreve-se como “...um Instituto de novas tecnologias, situado na interface Universidade – Indústria e vocacionado para a realização de atividade de investigação e de inovação de base tecnológica e transferência de tecnologia orientada para o tecido industrial. Nasceu em 1986 no seio do que são hoje os Departamentos de Engenharia Mecânica (DEMec) e de Engenharia e Gestão Industrial (DEGI) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Com a figura jurídica de Associação Privada sem Fins Lucrativos, o estatuto de «Utilidade Pública» e uma equipa própria de 200 colaboradores, assume-se como um agente ativo no desenvolvimento e consolidação de um modelo competitivo baseado no conhecimento, na densidade tecnológica dos produtos e processos e na inovação de base tecnológica” (INEGI, 2011).

A sua missão é, “Contribuir para o aumento da competitividade da indústria nacional através da investigação e desenvolvimento, demonstração, transferência de tecnologia e formação nas áreas de conceção e projeto, materiais, produção, energia, manutenção, gestão industrial e ambiente”.

2.2 MOTIVAÇÕES DO PROJETO

Atualmente, o processo de infusão a vácuo apresenta, na generalidade das suas aplicações, uma estrutura de controlo em malha aberta. Mesmo nos casos em que existe realimentação de informação, o propósito é controlar a direção do fluxo de resina e não outras variáveis de igual importância para uma infusão bem sucedida. Portanto, pretende-se inverter esta situação encontrando uma solução de controlo em malha fechada, com realimentação visual (câmara), que possibilite controlar variáveis, tais como a direção e a velocidade do fluxo de resina. Esta perspetiva de controlo é de elevada importância porque, controlando a velocidade, controla-se a quantidade de espaços vazios no interior das peças infundidas e, assim, as propriedades mecânicas atingem níveis superiores. A modelação dinâmica do processo é então indispensável porque, por um lado, possibilita o planeamento e a optimização das várias etapas inerentes a uma infusão a vácuo (simulações numéricas) e, pelo outro, é indispensável para a obtenção de controladores.

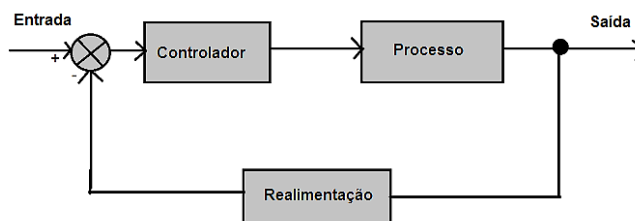


Figura 16 – Estrutura de controlo em malha fechada

A motivação para este trabalho surgiu essencialmente na indústria naval e no setor das energias renováveis, mais concretamente na produção de embarcações e de pás para geradores eólicos, em que os processos de moldagem dependem demasiado do controlo visual realizado pelos operadores. Desta forma, em caso de obtenção de resultados positivos no decorrer do projeto, estes setores industriais são, desde logo, alvos principais no que toca à possibilidade de implementação da tecnologia em questão.

2.3 DESCRIÇÃO E OBJETIVOS

Segundo a instituição, “O presente trabalho enquadra-se num projeto de investigação mais alargado que visa o desenvolvimento de sistemas de controlo automático por visão computacional de processos de Infusão a Vácuo utilizados na produção de pás de turbinas eólicas. Este projeto tem como objetivo a montagem de uma instalação experimental à escala, para testar em ambiente laboratorial metodologias de modelação dinâmica e controlo automático, por visão para processos de infusão a vácuo. Esta instalação experimental deverá permitir o teste das várias metodologias, sendo que todos os elementos deverão ser testados e afinados. Deverão ser desenvolvidos e validados modelos dinâmicos para os vários componentes e para o processo implementado.” (INEGI, 2015)

2.4 PLANEAMENTO DE TAREFAS

Na Tabela 5 apresenta-se o calendário inicial para a realização do projeto.

Tabela 5 – Planeamento de tarefas

Tarefa	Duração (semanas)
Revisão bibliográfica sobre modelação e controlo de processos de infusão a vácuo	3
Construção e afinação do sistema laboratorial automático de infusão a vácuo	6
Modelação dinâmica do sistema laboratorial automático de infusão a vácuo	6
Escrita do relatório	4

2.5 MERCADOS E SETORES DE APLICAÇÃO

Na secção 1.4.5. *Fatores de Utilização* foram abordadas algumas questões preponderantes relativamente aos processos de infusão a vácuo; no entanto, uma abordagem extensiva ao mercado nacional apresenta enumeras vantagens do ponto de vista do conhecimento e compreensão do tema.

Realizaram-se então alguns contactos de forma a obter uma clarificação dos seguintes assuntos: principais aplicações e produtos, número de trabalhadores, vantagens, desvantagens, dificuldades da tecnologia que possuem, problemas e custos de produção.

Entre as empresas contactadas encontram-se: a Belafibra, RPF Composite Service, Nautiber, Alto, Fibrauto, Famopol e os Estaleiros Navais de Peniche. Embora não tenha existido disponibilidade por parte de todas as empresas, foi possível verificar uma certa concordância relativamente ao nível tecnológico em que o processo se encontra e os inconvenientes inerentes ao mesmo. De seguida apresenta-se, de forma generalizada, a informação obtida.

Fazem infusões a vácuo?

À exceção de uma empresa, a resposta foi sempre positiva. Além da infusão a vácuo, também mencionaram a realização de outros processos de fabrico relacionados com os compósitos, nomeadamente, moldação manual assistida por vácuo, RTM ligeiro, projeção, enrolamento filamentar e pultrusão. No caso negativo, a empresa disse que tentou experiências com fibra de carbono, mas entretanto desistiu.

Principais aplicações e produtos

As áreas da náutica e da energia eólica estão muito relacionadas com este processo, mas não são as únicas. Kayaks, pás eólicas (reparação), componentes estruturais, peças decorativas e equipamentos industriais (em fibra de carbono) são alguns exemplos.

Número de trabalhadores numa infusão

Um a dois é o normal. No caso das pás de eólicas são necessários três por questões de segurança.

Defeitos e custos associados à produção

Existe unanimidade total neste tópico. Os defeitos usuais são: zonas com má impregnação, incorreta migração da resina, entrada de ar e saco por vezes mal dimensionado. Quanto aos custos, os gastos de energia e o material consumível são um problema, em especial o último.

Vantagens e desvantagens

Vantagens: elevada percentagem de fibra, peças mais finas e menos pesadas, laminados grandes e maior dureza superficial. Desvantagens: quantidade de resíduos, tempo de preparação e necessidade de pessoal especializado (formações).

CAPÍTULO 3

ESTADO DA ARTE

3.1 MODELAÇÃO PROCESSO DE INFUSÃO A VÁCUO

3.1.1 ESCOAMENTO

O modelo de escoamento é desenvolvido de forma a descrever o fluxo de resina através do meio fibroso e da camada de distribuição (se existir). Para tornar o modelo geral ainda mais próximo do comportamento real, o meio fibroso é considerado como heterogéneo e anisotrópico. A resina é considerada um fluido newtoniano com massa volúmica constante, ou seja, incompressível. Além disso desprezam-se efeitos gravíticos e, dependendo do caso, a variação da espessura pode ser, ou não, incluída (George, 2011; Heider, 2012).

Posto isto, as equações generalizadas que regem o escoamento são:

(1) Equação de continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho \partial u}{\partial x} + \frac{\rho \partial v}{\partial y} + \frac{\rho \partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

(2) Equação da lei de Darcy

$$\{\vec{U}_D\} = -\frac{1}{\mu} [K] \cdot \nabla P \Leftrightarrow \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{pmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Com,

\vec{U}_D - vetor de velocidade de Darcy;

μ - viscosidade do fluído;

$[K]$ – matriz de permeabilidade do meio fibroso;

P – pressão.

❶ Modelo de escoamento considerando a variação de espessura

A equação de continuidade apropriada para este caso é (Kelly *et al*, s.d.):

$$\nabla \cdot (hU_D) = -\frac{\partial(\phi h)}{\partial t} \xrightarrow[\frac{\partial \phi}{\partial t}=0]{\text{conservação de massa da fibra:}} \nabla \cdot (hU_D) = -\frac{\partial h}{\partial t}$$

onde, h é a espessura e ϕ o índice de porosidade.

Combinando com a lei de *Darcy*: $\nabla \cdot \left(h \frac{K}{\mu} \nabla P \right) = - \frac{\partial h}{\partial t}$ (3.3)

2 Modelo de escoamento sem variação de espessura

A equação de continuidade apropriada para este caso é (Kelly *et al*, s.d.):

$$\nabla \cdot U_D = 0$$

Combinando mais uma vez com a lei de *Darcy* resulta:

$$\nabla \cdot \left(\frac{K}{\mu} \nabla P \right) = 0$$
 (3.4)

3 Velocidade da frente de escoamento

A velocidade da frente de escoamento (U_T) está relacionada com a velocidade de *Darcy* (U_D) através da porosidade (\emptyset) do reforço de fibra, que se verifica pela seguinte equação (Heider, 2012):

$$U_T = \frac{U_D}{\emptyset}$$
 (3.5)

Relativamente à porosidade, esta refere-se à fração de espaço vazio existente no interior do meio fibroso, ou seja (Heider, 2012),

$$V_f + \emptyset = 1$$
 (3.6)

sendo V_f a fração de volume de fibra.

3.1.2 PERMEABILIDADE

1 Definição

A permeabilidade define-se como a capacidade que um meio fibroso apresenta, para que ocorra escoamento de um determinado fluido através da sua estrutura, Figura 17. Este parâmetro depende diretamente das características do reforço de fibra; no entanto, as condições de escoamento também a podem influenciar de forma indireta, ou seja, com a alteração da porosidade.

Uma das implicações da utilização da lei de *Darcy* é a necessidade do conhecimento prévio do valor de permeabilidade; portanto, o maior desafio que se impõe neste momento é saber como obter esses valores. Para resolver este problema, no caso mais simples, é necessário executar pelo menos um ensaio experimental e, com os valores resultantes, substituir na lei de *Darcy* e resolver em ordem ao coeficiente de permeabilidade.

Após o conhecimento de todos os parâmetros do processo é então possível prever o comportamento do escoamento no meio fibroso e determinar a localização das portas de injeção e extração que otimizam o processo. Com isto, a previsibilidade aumenta, o controlo aumenta e a qualidade do produto final será superior.



Figura 17 – Amostra de tecido de fibra com linhas de fluxo no meio fibroso (Lomov, 2014)

Tal como já mencionado na secção anterior, em meios fibrosos com estrutura anisotrópica a permeabilidade apresenta-se sob a forma de um tensor:

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}$$

Este tensor pode ser diagonalizado para se obterem os três valores principais de permeabilidade de um reforço fibroso. Geralmente assume-se que os dois primeiros valores principais, K_1 e K_2 , coincidem com o plano das fibras, enquanto o terceiro, K_3 , é direccionado no sentido da espessura. O padrão no plano de fluxo é, portanto, uma elipse orientada segundo um ângulo β em relação à direcção de escoamento, Figura 18 (Verneta e Ruiza, 2014).

Esta definição depende essencialmente da orientação com que as fibras são colocadas relativamente à direcção de escoamento. Por exemplo, se as fibras estiverem paralelas à direcção do fluxo então é possível que a matriz de permeabilidade obtida seja diagonal (George, 2011):

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix}$$

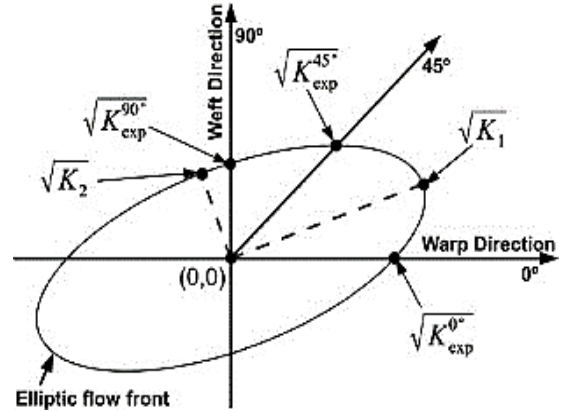


Figura 18 – Padrão elíptico de um fluido que se escoa através de um reforço fibroso (Verneta e Ruiza, 2014)

Na realidade, a permeabilidade na direcção da espessura é cerca de 1 a 2 ordens de grandeza menor que a verificada no plano das fibras, por esse motivo é comum desprezar o seu efeito, transformando um problema de 3 dimensões em apenas 2 dimensões (Verneta e Ruiza, 2014). Ainda assim, existem casos em que é possível admitir o meio fibroso como isotrópico, tornando o tensor numa simples constante de permeabilidade (George, 2011).

2 Escoamento Unidirecional

Num escoamento unidirecional, com um campo de pressões constante, a permeabilidade é obtida através da integração da lei de Darcy, em ordem ao tempo (R. Arbter 2011), resultando em,

$$K = - \frac{X_{ff}^2 \phi \mu}{2 \Delta P t_{ff}} \quad (3.7)$$

A aplicação da equação descrita implica que a posição da frente de fluxo seja reta, no entanto, tal pode não ocorrer na realidade, Figura 19.

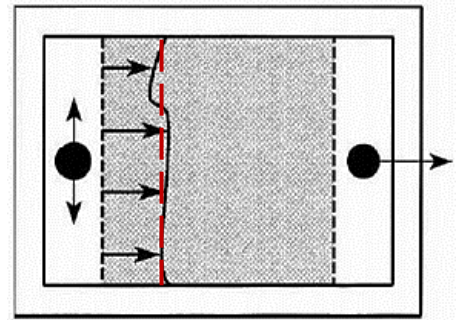


Figura 19 – Escoamento unidirecional (George, 2011)

3 Escoamento Radial

Um fluxo radial insaturado, Figura 20, é regido pela equação de *Laplace*, que deriva da combinação da lei de *Darcy* com a equação de continuidade para fluidos incompressíveis (R. Arbter, 2011). A solução do problema, para uma diferença de pressão constante e um reforço de fibra isotrópico, devolve a permeabilidade (R. Arbter, 2011):

$$K = \frac{\Phi \eta R_0^2}{4 \Delta p t_{ff}} \left(\left(\frac{R_{ff}}{R_0} \right)^2 \left(2 \ln \left(\frac{R_{ff}}{R_0} \right) - 1 \right) + 1 \right) \quad (3.8)$$

onde,

R_{ff} – raio da frente do escoamento;

t_{ff} – tempo a que ocorre R_{ff} ;

R_0 – raio da porta de injeção.

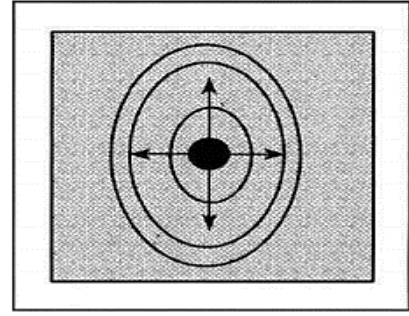


Figura 20 – Escoamento radial (George, 2011)

3.1.3 COMPACTAÇÃO DO MEIO FIBROSO

Durante um processo de infusão a vácuo, a diferença entre o gradiente de pressão da resina, a pressão do reforço e a pressão atmosférica provoca uma compactação volumétrica do meio fibroso. Na Figura 21 verifica-se que este fenómeno tem influência direta na espessura da peça processada e tal ocorre devido ao equilíbrio das forças exteriores e interiores. Na zona de entrada da resina, a pressão é próxima da atmosférica, assim o reforço não é compactado significativamente, portanto a espessura apresenta um valor máximo. Pelo contrário, a pressão na frente de fluxo é igual à do vácuo resultando o equilíbrio de forças numa espessura menor (Li, 2006).

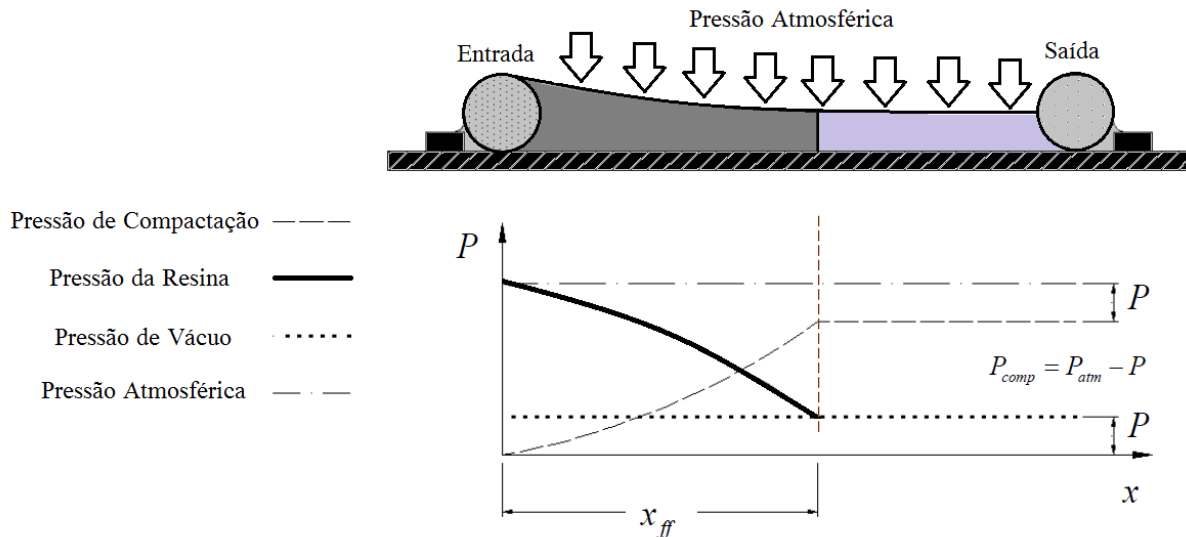


Figura 21 – Gradientes de pressão na resina e no reforço. Baseado em (Correia, 2004)

A par da espessura, a permeabilidade e a porosidade do reforço também são influenciados, alterando, portanto, todas as variáveis relacionadas com o meio fibroso.

Segundo *Gutowski* a relação entre a fração de volume de fibra compactada (V_f) e a pressão de compactação (P_{comp}) é dada por (Heider, 2012):

$$P_{comp} = A_s \frac{\left(\frac{V_f}{V_{f0}} - 1\right)}{\left(\frac{1}{V_f} - \frac{1}{V_{fa}}\right)^4} \quad (3.9)$$

onde,

A_s - constante de rigidez do reforço de fibra;

V_{f0} - fração de volume de fibra para uma pressão de compactação nula;

V_{fa} - fração de volume de fibra para uma máxima pressão de compactação.

Todos os parâmetros são dependentes da estrutura do reforço, logo podem ser obtidos por estimativa ou experimentalmente. Uma outra abordagem ao problema pode ser feita através de um modelo empírico introduzido por *Robitaille* e *Gauvin* (Heider, 2012):

$$V_f = V_{f0} \cdot P_{comp}^B \quad (3.10)$$

com,

V_{f0} - a fração de volume de fibra para uma pressão de compactação de 1Pa;

B - índice de rigidez determinado a partir do material do reforço.

Este modelo empírico é largamente utilizado, porque são necessárias apenas duas constantes, também elas empíricas, que, por sua vez, são facilmente obtidas pela realização de vários ensaios de compactação (Heider, 2012).

Batch investigou o comportamento de diferentes tipos de reforço quando submetidos à compactação e conseguiu relacioná-la com a espessura usando o seguinte modelo (Heider, 2012):

$$V_f = \frac{n \cdot W_a}{\rho_f \cdot h} \Leftrightarrow h = \frac{n \cdot W_a}{\rho_f \cdot V_f} \quad (3.11)$$

com,

n - número de camadas de fibra;

W_a - peso por unidade de área de cada camada;

ρ_f - densidade da fibra;

h - espessura.

NOTA: A compactação do meio fibroso influencia a permeabilidade e relacionam-se pela equação Carman-Kozeny: $K = k \frac{(1-V_f)^3}{V_f^2}$; K - permeabilidade; k - determinado experimentalmente; V_f - fração de volume de fibra compactada.

3.1.4 QUÍMIO-REOLOGIA

1 Submodelo de Cura

As resinas termoendurecíveis são tipicamente usadas nos processos de infusão a vácuo e a par da sua utilização são necessários outros produtos, tais como, aceleradores, catalisadores, inibidores e promotores. A adição dos mesmos tem como objetivo o controlo do processo de cura da resina, de acordo com as especificidades que o utilizador desejar.

A forma típica da expressão correspondente ao modelo dinâmico de cura é (Song, 2003):

$$\frac{d\vartheta}{dt} = f(T, \vartheta)(1 - \vartheta)^n \quad (3.12)$$

onde,

d ϑ /dt - taxa de reação ou cura;

ϑ - grau de cura;

T - temperatura da resina;

f(T, ϑ) - função que depende do tipo de reação;

n - constante determinada experimentalmente.

No entanto, o processo de infusão a vácuo é habitualmente executado à temperatura ambiente, por isso, admite-se que a temperatura da resina é constante e igual à temperatura ambiente, simplificando bastante o modelo de cura. A Calorimetria Diferencial de Varredura e a Análise Térmica Diferencial são duas abordagens comuns para desenvolver um modelo de cura (Song, 2003).

Se a difusão de espécie química e a convecção do fluido forem desprezadas, o grau de cura em cada ponto material pode ser determinado por integração, em ordem ao tempo, da expressão da taxa de cura, resultando então na seguinte forma (Song, 2003):

$$\vartheta = \int_0^t \left(\frac{d\vartheta}{dt} \right) dt \quad (3.13)$$

2 Submodelo de Viscosidade

Para prever com precisão o processo de infiltração da resina, a viscosidade da mesma deve ser caracterizada como uma função de variáveis espaciais e temporais. Não existe nenhum modelo analítico que possa descrever precisamente o comportamento da viscosidade, pois depende de vários fatores não lineares. No entanto, uma aproximação é considerar que a resina apresenta um comportamento newtoniano e que a viscosidade é referente a velocidades de corte bastante baixas (Song, 2003).

A viscosidade pode então ser determinada em função da temperatura e do grau de cura (D.S. Kim, 1998):

$$\mu(T, \vartheta) = \mu_0(T) \left[\frac{\vartheta_g}{\vartheta_g - \vartheta} \right]^{A(T) + B(T)\vartheta} \quad (3.14)$$

\downarrow
 $\eta_0(T) = A_\eta \exp\left(\frac{E_\eta}{RT}\right)$

μ - viscosidade;

μ_0 - viscosidade para um valor nulo da taxa corte;

T - temperatura;

ϑ_g - grau de cura em gel;

ϑ - grau de cura;

A e B - parâmetros que dependem da temperatura da resina.

3.1.5 ACOPLAMENTO DOS MODELOS

Para o acoplamento dos modelos descritos nas secções anteriores é necessário ter em consideração dois tipos distintos de escoamento numa infusão, um sem a influência da compactação e outro com a influência da compactação. De seguida é realizada uma análise a cada um deles.

❶ Sem Compactação

Na base desta modelação encontra-se a lei de *Darcy* (3.1) e a equação de continuidade (3.2). Considerando o meio como isotrópico e com escoamento unidirecional, a equação que nos descreve o avanço da frente de fluxo (*Darcy*) apresenta a seguinte forma:

$$u_x = -\frac{K}{\mu \cdot \emptyset} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (3.15)$$

Não considerando o efeito da compactação, as propriedades inerentes ao processo (K , μ e \emptyset) apresentam valores constantes. Relativamente ao campo de pressões, pode ser calculado por:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \{\vec{U}_D\} &= 0 \Leftrightarrow \frac{d}{dx}(u_x) = 0 \Leftrightarrow \frac{d}{dx} \left(-\frac{K}{\mu \cdot \emptyset} \cdot \frac{dP}{dx} \right) = 0 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow 0 \cdot dx^2 = d(dP) \Leftrightarrow \iint 0 \, dx^2 = \iint d(dP) \Leftrightarrow \int C_1 \, dx = \int dP \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow C_1 x + C_2 = P \end{aligned}$$

<p><i>Condições de Fronteira:</i></p> <p>$x = 0: C_2 = P_e$</p> <p>$x = x_{ff}: C_1 = \frac{(P_v - P_e)}{x_{ff}}$</p>	\longrightarrow	$P = \frac{(P_v - P_e)}{x_{ff}} x + P_e \quad (3.16)$	
---	-------------------	---	--

com,

P_e : pressão à entrada da infusão;
 P_v : pressão de vácuo;
 X_{ff} : posição da frente de fluxo.

A equação (3.16) mostra que num escoamento deste tipo, o campo de pressões é linear e apresenta uma condição de fronteira móvel. Desta forma, sabendo a posição instantânea da frente de fluxo, calcula-se o gradiente de pressão, que posteriormente entra na lei de *Darcy* para a obtenção da posição seguinte da frente de fluxo.

2 Com Compactação

Tal como no caso anterior, a equação de *Darcy* mantém-se válida para a obtenção da posição da frente de fluxo; no entanto, todos os parâmetros, à exceção da viscosidade e do campo de pressões passam a ser variáveis dependentes do estado de compactação do meio fibroso. Posto isto, o grande desafio é encontrar a forma do gradiente de pressão (Correia, 2004).

Substituindo a lei de *Darcy* na equação (3.3) obtém-se:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{\partial \left(- \frac{h \cdot K}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \right)}{\partial x} \quad (3.17)$$

Expandindo-se as derivadas parciais:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left[\left(K \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + h \cdot \frac{\partial K}{\partial x} \right) \frac{\partial P}{\partial x} + h \cdot K \cdot \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \right] \quad (3.18)$$

Sabe-se que tanto a permeabilidade (K), como a espessura (h) são variáveis dependentes da pressão (P), que por sinal é dependente da posição (x), portanto:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left[\left(K \cdot \frac{dh}{dP} + h \cdot \frac{dK}{dP} \right) \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + h \cdot K \cdot \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \right] \quad (3.19)$$

Visto que o problema apresenta condições de fronteira móveis, o próximo passo visa contornar esta dificuldade realizando a seguinte mudança de variável:

$$\alpha = \frac{x}{L} \quad (3.20)$$

Em que L corresponde à posição instantânea da frente de fluxo. Através desta mudança, P passa a ser uma função composta e a sua forma diferencial resulta em (Correia 2004):

$$\frac{\partial (P(\alpha(x)))}{\partial x} = \frac{\partial P(\alpha)}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha(x)}{\partial x} \quad (3.21)$$

Aplicando (3.21) em (3.19),

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{\mu \cdot L^2} \left[\left(K \cdot \frac{\partial h}{\partial P} + h \cdot \frac{\partial K}{\partial P} \right) \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha} \right)^2 + h \cdot K \cdot \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \alpha^2} \right) \right] \quad (3.22)$$

O lado esquerdo da equação (3.21) também pode ser decomposto da seguinte forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial (h(\alpha(L(t))))}{\partial t} = \frac{\partial (h(\alpha))}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial (\alpha(L))}{\partial L} \cdot \frac{\partial (L(t))}{\partial t} \quad (3.23)$$

Aplicando a lei de *Darcy* na equação (3.23) e rearranjando os termos obtém-se:

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{h^* \cdot \alpha \cdot K}{\mu \cdot L^2} \cdot \frac{\partial h}{\partial P} \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha} \right)^2 \quad \text{with} \quad h^* = \frac{h}{[h]_{\alpha=1}} \quad (3.24)$$

onde h^* representa a espessura normalizada relativamente à espessura na frente de fluxo (Correia, 2004). Substituindo a equação (3.24) na (3.22) e rearranjando os termos,

$$\frac{d^2 P}{d\alpha^2} = \left(\left(\frac{h^* \cdot \alpha - 1}{h} \right) \cdot \frac{dh}{dP} - \frac{1}{K} \cdot \frac{dK}{dP} \right) \cdot \left(\frac{dP}{d\alpha} \right)^2 \quad (3.25)$$

Através das equações (3.6), (3.10) e (3.11) obtém-se:

$$\frac{dK}{dP} = k \cdot B \cdot \frac{\left(-3 \cdot P_{Comp}^{-(B+1)} \cdot v_{f0} + P_{Comp}^{B-1} \cdot v_{f0}^3 + 2 \cdot P_{Comp}^{-2 \cdot B-1} \right)}{v_{f0}^2} \quad (3.26)$$

e

$$\frac{dh}{dP} = \frac{\rho_{surface}}{\rho} \cdot \frac{B}{v_{f0} \cdot P_{comp}^{B+1}} \quad (3.27)$$

Substituindo as equações (3.26) e (3.27) em (3.25) obtém-se a equação responsável pela obtenção do perfil de pressões ao longo da zona impregnada com resina. Verifica-se ainda que a variável tempo não integra a equação (3.25) tornando este gradiente invariante no referencial normalizado α (Correia, 2004).

Para a resolução deste problema utiliza-se um método numérico, por exemplo, o método de *Euler* ou o método de *Runge-Kutta* de 4ª ordem. Depois de concluída, a variável original x é retomada e a próxima posição da frente de fluxo é calculada (George, 2011).

3.1.6 FUNÇÃO DE APROXIMAÇÃO DO CAMPO DE PRESSÕES

Em 3.1.5 foi desenvolvida a equação através da qual se obtém o campo de pressões ao longo do referencial normalizado (α). No entanto, a solução encontrada requer métodos numéricos. Para contornar este tipo de resolução, Correia (2004) propõe que se realize a seguinte aproximação polinomial de segunda ordem:

$$P(\alpha) = a \cdot \alpha^2 + b \cdot \alpha + c \quad (3.28)$$

Na Figura 22 encontra-se exemplificado um campo de pressões com a respetiva aproximação polinomial. Segundo Correia (2004), no pior dos casos obtêm-se regressões com um coeficiente $R^2=0.99$, que na realidade corresponde a uma aproximação bastante precisa.

Relativamente aos coeficientes da função, parte deles são calculados através das condições de fronteira:

$$\alpha = 0 \rightarrow P = P_e \rightarrow c = P_e$$

$$\alpha = 1 \rightarrow P = P_v \rightarrow b = P_v - P_e - a$$

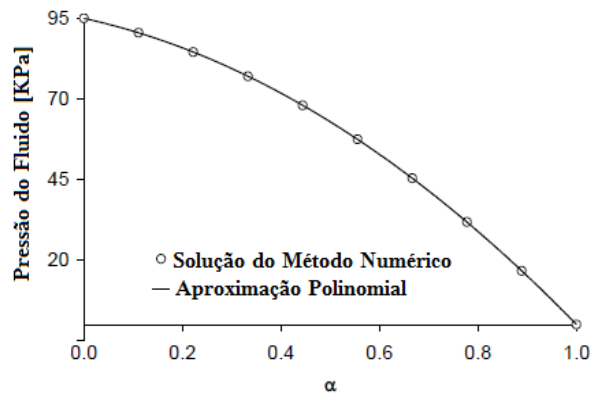


Figura 22 - Aproximação polinomial de segunda ordem.
Baseado em (Correia, 2004)

Portanto,

$$P(\alpha) = a \cdot \alpha^2 + (P_v - P_e - a) \cdot \alpha + P_e \quad (3.29)$$

com,

P_v - pressão de vácuo

P_e - pressão à entrada da infusão

O coeficiente ' a ' é um parâmetro a determinar experimentalmente, que depende da pressão de entrada (P_e), da pressão de vácuo (P_v) e da fração de fibra inicial (v_{f0}), Figura 23. Quando se trata de um escoamento sem a influência de compactação, $a = 0$ e o campo de pressões é linear (Correia, 2004).

O parâmetro ' a ' é portanto uma medida da não linearidade do sistema devido ao efeito de compactação existente durante a infusão (Correia, 2004).

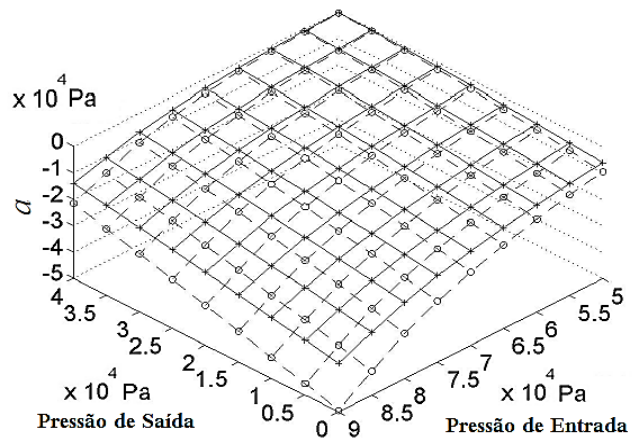


Figura 23 – Variação de ' a ' em função de P_e e P_v , para $v_{f0} = 0.1$ (superfície de baixo) e $v_{f0} = 0.25$ (superfície de cima).
Baseado em (Correia, 2004)

3.1.7 OUTROS FENÓMENOS AGREGADOS

① Capilaridade

A capilaridade é um fenómeno físico que ocorre em fluídos que se encontram em contacto com uma superfície sólida. Descreve-se como uma deslocação do fluido e resulta do equilíbrio entre as forças de coesão e as forças de adesão, ou seja, se a tensão superficial do fluido for elevada, o mesmo tende a manter a forma e a tendência é para que não exista aderência com a superfície. Por outro lado, se as forças de adesão superarem as forças de coesão do fluido, o mesmo tende a deslocar-se ao longo da superfície (George, 2011). A quantificação deste fenómeno denomina-se por pressão capilar e, no caso de escoamentos em meios fibrosos, calcula-se pela seguinte equação:

$$P_{cap}(t) = \frac{F}{D_f} \cdot \frac{1-\phi}{\phi} \cdot \gamma \cos[\theta_{CD}(t)] \quad (3.30)$$

onde,

D_f – diâmetro das fibras;

F – parâmetro igual a 4 para fluxo paralelo e 2 para fluxo transversal;

θ_{CD} – ângulo de contacto dinâmico entre o fluido e a superfície;

γ – tensão superficial do fluido;

ϕ – porosidade.

O ângulo de contacto dinâmico é uma característica que depende essencialmente das forças de carácter viscoso e da própria capilaridade, portanto propriedades como a tensão superficial, a viscosidade e a velocidade do fluido, integram o seu cálculo:

$$\theta_{CD}(t) = \arccos \left[\cos \theta_{CS} - (\cos \theta_{CS} + 1) \tanh \left(4.96 \left(\frac{\mu(t)}{\gamma} \cdot \frac{dx}{dt} \right)^{0.702} \right) \right] \quad (3.31)$$

θ_{CS} representa o ângulo estático, ou seja, o ângulo para o qual não existe velocidade relativa entre o fluido e a superfície (George, 2011).

Posto isto, na ocorrência de velocidades elevadas, o fluxo capilar é desprezável e o escoamento dá-se essencialmente por *intertows*. Por outro lado, quando a velocidade é reduzida, a resina flui *intratows* por ação da pressão capilar. Na generalidade dos casos, esta é uma propriedade comumente desprezada porque o diferencial de pressões é bem superior ao valor da pressão capilar, assim o erro obtido é desprezável (George, 2011). No entanto, se esse diferencial for reduzido, por alteração da pressão de entrada (por exemplo), o erro torna-se cumulativo e todos os cálculos que se realizarem sobre o pressuposto de inexistência da capilaridade, apresentarão erros consideráveis.

A equação (3.32) descreve o comportamento do erro em função da alteração das pressões de entrada e/ou saída da infusão.

$$Erro (\%) = \frac{P_{cap}}{P_{cap} + (P_e - P_v)} \cdot 100 \quad (3.32)$$

A título de exemplo no Gráfico 1 mostra-se a evolução do erro, considerando uma pressão capilar de 5 kPa e $\Delta P = P_e - P_v$. Evidencia-se uma clara discrepância quando $\Delta P = 0$, portanto este é um fenómeno a ter em conta.

São várias as pesquisas em torno deste assunto e embora não seja conclusivo sabe-se que a pressão capilar não tem um comportamento bem definido. O seu sinal pode variar, dependendo das propriedades instantâneas da infusão, e relaciona-se com o gradiente de pressão da resina da seguinte forma:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{1}{x_{ff}} [P_v - (P_e \pm P_{cap})] \quad (3.33)$$

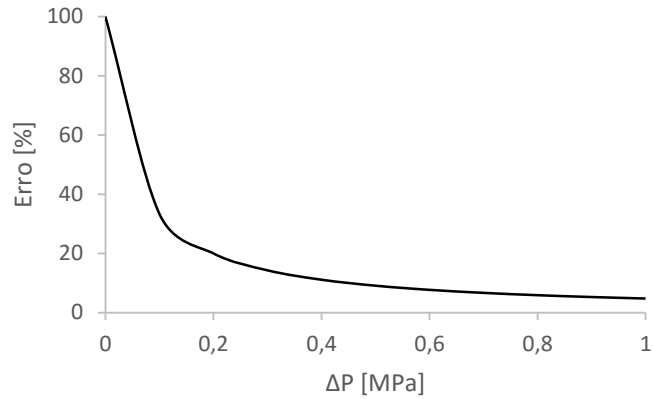


Gráfico 1 – Evolução do erro para $P_{cap} = -5\text{kPa}$

2 Histerese de Compactação

Embora já tenha sido apresentada a equação (3.10) como sendo representativa do estado de compactação do meio fibroso, na realidade existe um outro efeito, também de carácter viscoelástico, que influencia a evolução da fração de fibra com a pressão de compressão.

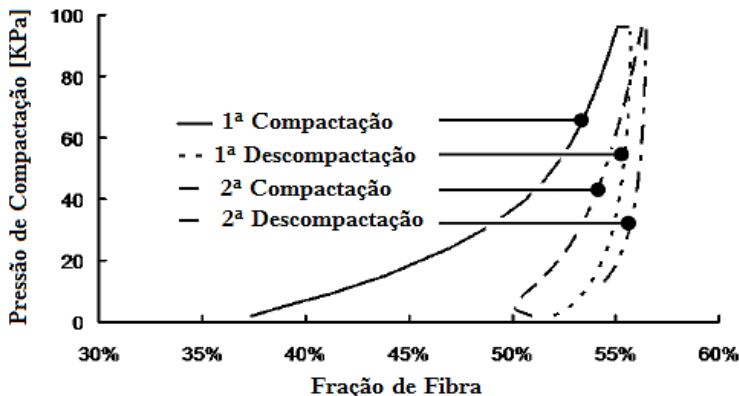


Figura 24 – Ciclos de compactação/ descompactação.
Baseado em (Correia 2004)

George (2011) estudou este fenómeno e verificou que ao realizar um ciclo de compactação seguida de uma descompactação, a evolução da fração de fibra não é a mesma, ou seja, ocorre uma histerese no processo de compactação. Além disso, ao realizar testes de relaxação verificou que a fração de fibra continua a aumentar, o que equivale a uma ‘pastificação’ do meio fibroso.

Correia (2004) realizou os mesmos testes e as curvas que obteve apresentam a forma mostrada na Figura 24, sendo os períodos de relaxação (1 minuto) representados pelos topos da curva.

Apesar da histerese apresentar alguma influência no processo de compactação, o seu comportamento não será incluído na modelação do sistema. De qualquer forma, a sua enunciação é importante porque poderá justificar alguns desvios evidenciados.

3.1.8 SÍNTESE DA MODELAÇÃO

Na Figura 25 está representado o modelo geral de um processo de infusão a vácuo, com as diversas relações de interdependência entre os submodelos enunciados anteriormente. No lado esquerdo estão representadas as variáveis necessárias para a execução de cada modelo, no lado direito o resultado obtido em cada modelo e no centro estão representadas as dependências.

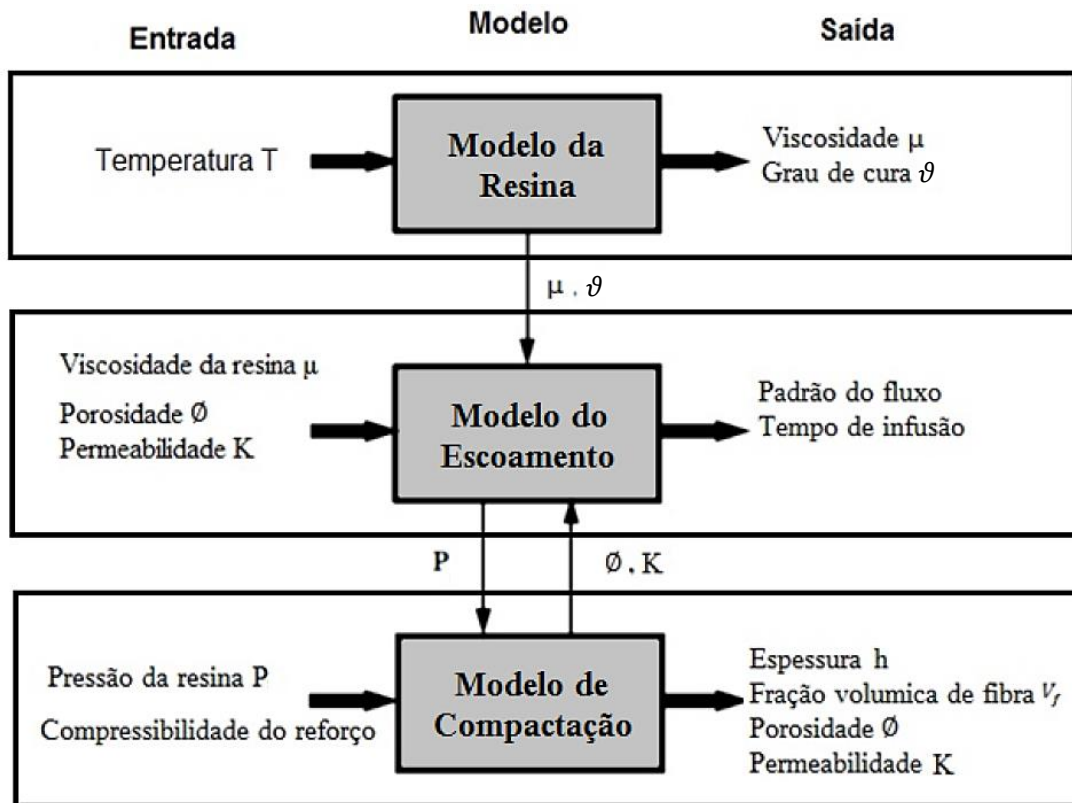


Figura 25 – Diagrama de interdependência dos modelos existentes. Baseado em (Song, 2003)

O modelo global funciona basicamente da seguinte forma:

1. Leitura da temperatura;
2. Com o modelo da resina, calcular a viscosidade e o grau de cura;
3. Entrada da viscosidade da resina e das constantes iniciais de porosidade e permeabilidade, no modelo do escoamento;
4. Obtenção da posição da frente de fluxo;
5. Cálculo do tempo necessário para finalizar a infusão e do gradiente de pressões da resina;
6. Com a pressão da resina e o modelo de compactação, assim como as suas constantes inerentes, determinar a espessura, fração volúmica da fibra, porosidade e permeabilidade;
7. Prosseguir para o próximo instante de tempo (por incrementação da variável tempo);
8. Recomeçar o ciclo com os novos valores dos parâmetros e das condições de fronteira.

3.2 INCERTEZAS NO PROCESSO VIP

Os processos de fabrico de materiais compósitos são, na sua generalidade, uma fonte de um vasto número de incertezas associadas à variação das propriedades dos materiais e à variação das condições de fronteira (espessuras e posição da frente de fluxo) (T.S. Mesogitis, 2013). É essencial o estudo dessas incertezas de forma a poder-se antecipar ou, até, evitar consequências prejudiciais para as propriedades finais do compósito laminado.

3.2.1 VARIAÇÃO INTERNA DOS REFORÇOS

Os reforços são formados por fibras organizadas de forma a otimizar o comportamento do material compósito em determinadas aplicações. São estas fibras que influenciam diretamente o processo de infusão e, portanto, a sua homogeneidade é um fator de extrema importância no desenrolar do escoamento. No entanto, reforços perfeitamente homogêneos são irreais e encontrar uma solução para este problema pode ser uma busca interminável.

Embora os reforços sejam fabricados segundo diretrizes e procedimentos bem definidos, a verdade é que as suas características são uma variável quase que incontrolável. Simples procedimentos, tais como, o transporte, o manuseio ou até o armazenamento em rolos, alteram constantemente o alinhamento das fibras, Figura 26 (T.S. Mesogitis, 2013).

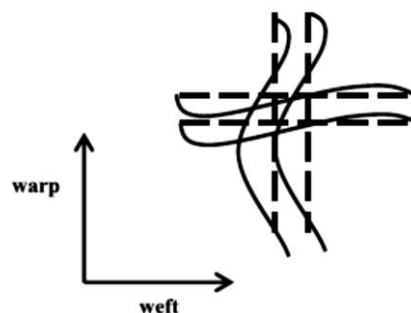


Figura 26 – Desalinhamento das fibras (T.S. Mesogitis, 2013)

A orientação das fibras revela-se, portanto, como um problema estocástico em que a sua variabilidade pode ser descrita por uma distribuição normal. Segundo alguns investigadores, o coeficiente de variação das dimensões dos *tows*⁴ e o espaçamento *inter-tows* pode atingir valores de 16% e 6%, respetivamente. No caso de tecidos de fibra não ondulados, a variação das dimensões dos *tows* varia entre 4% e 8%, enquanto, que a distância entre eles pode variar em torno dos 3 a 4% (T.S. Mesogitis, 2013).

3.2.2 INCERTEZAS DERIVADAS DO *PRE-FORMING*

O *pre-forming* é um procedimento utilizado para que o reforço adquira um formato próximo do que será o produto final, antes da execução da infusão. Tal proporciona um melhor encaixe no molde, facilita a execução da infusão e melhora a qualidade do laminado.

Embora apresente vantagens, a sua utilização implica o aparecimento de zonas da fibra com deformação plástica, resultando numa inevitável variação dimensional das fibras. São vários os processos que ocorrem a nível microscópico, entre quais, o enrugar das fibras, as deformações de cisalhamento, o deslizamento e a mudança de ângulo das fibras. Combinando os seus efeitos, resulta em variações locais de volume e de espessura do reforço que influenciam drasticamente as propriedades macroscópicas (T.S. Mesogitis, 2013).

Simulações estocásticas mostram que a incerteza na orientação dos *tows* pode causar variações significativas na forma final do tecido de fibra, com coeficientes de variação das tensões, devido a um enrugamento mínimo a médio, na gama de 10 a 20% (T.S. Mesogitis, 2013).

⁴ Tow – Na indústria dos compósitos um tow é um feixe de fibras

Como será relatado nas secções seguintes, estes efeitos podem influenciar uma ampla variedade de parâmetros, tais como a permeabilidade, o desenvolvimento de tensões residuais durante a fase de cura, a precisão dimensional e as propriedades mecânicas do componente final, evidenciando-se, assim, uma forte interdependência das diversas fontes de variabilidade no fabrico de compósitos (T.S. Mesogitis, 2013).

3.2.3 INCERTEZAS DURANTE A INFUSÃO

A permeabilidade do reforço seco é um dos parâmetros chave para o controlo eficaz de um processo de infusão a vácuo. Por esse motivo, existe um volume considerável de investigações em torno do que se considera ser uma possibilidade de análise e caracterização, da aleatoriedade da estrutura fibrosa.

Já se verificou que desvios a nível microscópico podem influenciar seriamente as propriedades a nível macroscópico. A permeabilidade não é exceção e existem simulações e resultados experimentais de tecidos não ondulados, que mostram uma linearidade entre o coeficiente de variação da permeabilidade e o coeficiente de variação da fração do volume de fibra. Relativamente à permeabilidade, observaram-se desvios-padrão relativos até 20% durante as medições; no entanto, outros estudos mostraram que o desvio padrão relativo pode mesmo atingir valores de 30%, Tabela 6. É de realçar que estes valores foram obtidos por experiências com reforços não ondulados, portanto nos casos em que são utilizados, por exemplo, reforços acomodados em rolos, estes valores podem tornar-se muito elevados (T.S. Mesogitis, 2013).

O padrão da frente do fluxo pode variar consideravelmente com esta inconsistência e, mesmo para reforços com porosidades iguais, a heterogeneidade da estrutura fibrosa sobrepõe-se a todos os outros efeitos. Verificou-se que em porosidades na gama de 0.45 a 0.7, a permeabilidade transversal diminui à medida que a heterogeneidade da fibra aumenta (T.S. Mesogitis, 2013).

Outros efeitos que influenciam o comportamento de forma relevante são: o *nesting*⁵, que se relaciona com o acondicionamento das fibras e a espessura do laminado; o efeito de bordo, ou seja, todos os elementos que induzem incerteza ao longo dos limites geométricos, nomeadamente as *race tracking*⁶; e a formação de bolhas ou zonas de vazio (estudos experimentais têm demonstrado que, para um aumento de 1% no teor de vazios, a resistência à flexão, o módulo de flexão e a resistência ao corte interlaminar pode diminuir mais de 5%) (T.S. Mesogitis, 2013).

Tabela 6 - Medições de permeabilidade para dois tecidos não ondulados de fibra de vidro (T.S. Mesogitis, 2013)

Material	Dimensões	V _f (%)	K ₁ (10 ⁻¹⁰ m ²)	K ₂ (10 ⁻¹⁰ m ²)
Tecido de fibra 1	300 × 300 mm	41.7	1.79 ± 0.4 (±22.3%)	1.44 ± 0.29 (±20%)
Tecido de fibra 2	200 mm (circular)	53	1.24 ± 0.36 (±29.2%)	0.65 ± 0.167 (±25.7%)

3.2.4 INCERTEZAS NA CURA

O processo de cura é um fenómeno físico-químico complexo que envolve várias fontes de incerteza, tais como, a variação das características de ferramentas e do material, bem como, incertezas nas condições fronteira ambientais. Estas influenciam na formação de tensões

⁵ *Nesting* - Refere-se a algo que foi organizado por camadas/grupos

⁶ *Race tracking* - São as zonas do contorno do molde onde a resina flui quase sem oposição

3.3 CONTROLO DE PROCESSOS DE INFUSÃO A VÁCUO

Atualmente existem algumas formas de controlo na produção dos materiais obtidos por processos de infusão a vácuo, nomeadamente, o derrame (sangramento) de resina, o controlo passivo e o controlo ativo.

Relativamente ao derrame de resina, na realidade não apresenta qualquer tipo de controlo computacional e refere-se, basicamente, a uma continuação do fluxo de resina, após esta preencher a totalidade do molde, por forma a reduzir os defeitos típicos neste tipo de processamento. Claro que os desperdícios de resina são bastante avolumados e, portanto, a necessidade de evitar esta técnica é crucial para minimizar os custos económicos e ambientais.

Quanto aos tipos de controlo passivo e ativo, ambos apresentam as suas particularidades e são de elevada relevância, porque podem possibilitar o enchimento total do molde sem que ocorram bolhas de ar ou zonas não impregnadas.

3.3.1 CONTROLO PASSIVO

No controlo passivo não existe qualquer realimentação de variáveis do sistema; desta forma, o controlador não apresenta sensibilidade sobre o ‘estado atual’ e a execução do processo torna-se muito dependente da ausência de perturbações.

Para a implementação deste tipo de controlo é necessário fazer um estudo prévio, analítico e/ou experimental, ao comportamento do processo. Através da predefinição de possíveis variações nas propriedades dos materiais e condições de fronteira, determina-se um modelo numérico e, posteriormente, executam-se várias simulações de forma a criar uma base de dados com possíveis cenários do fluxo de resina (Modi et al, 2007).

Geralmente os controladores sem realimentação (malha aberta), Figura 28, são empregues em sistemas, cujo comportamento é muito estável. Para a evolução que se pretende e do conhecimento sobre estes processos, tal não é o caso, e a sua implementação pode provocar desvios do comportamento consideráveis aquando da execução do processo.

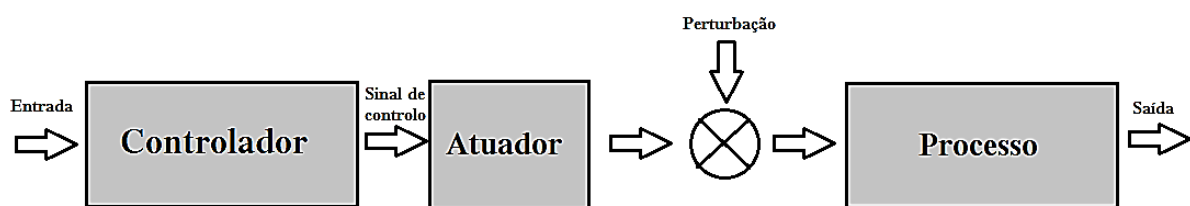


Figura 28 – Controlo em malha aberta

3.3.2 CONTROLO ATIVO

As perturbações são de facto uma constante nos processos de infusão a vácuo, e tal como já foi mencionado em secções anteriores, estas podem surgir num vasto leque de propriedades associadas a cada um dos elementos. Portanto, na impossibilidade de eliminar tais incertezas, há que considerá-las no modelo e utilizar um controlo ativo para observar a variação e a magnitude das mesmas. O sistema passa a ter realimentação e apresenta uma estrutura idêntica à da Figura 29.

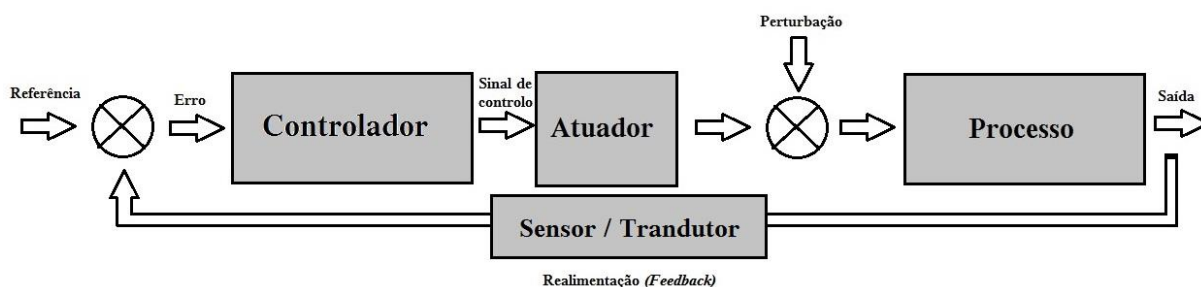


Figura 29 – Controlo em malha fechada

Analogamente ao controlo passivo, é necessário realizar um estudo prévio de forma a obter um modelo dinâmico que represente de forma simples, mas suficiente, o comportamento do processo a controlar. Também é necessário averiguar o tipo e a estimativa da magnitude das incertezas que atuam sobre o processo. A grande diferença reside no facto de o sistema reagir às perturbações aquando do seu funcionamento, ou seja, além de se impor um determinado perfil de funcionamento, também se consegue reduzir o efeito das perturbações de carácter aleatório.

Torna-se obvio que utilizar um controlo em malha fechada é de facto vantajoso e verifica-se que, dentro desta possibilidade, vários investigadores optam tendencialmente por controladores adaptativos. Apesar disso, outras metodologias de controlo foram referenciadas na literatura de referência, nomeadamente o controlo não linear de estrutura variante por superfície de deslizamento (Mogavero *et al*, 1997).

A título de exemplo, na Figura 30 estão representados dois processos de infusão a vácuo finalizados, em que os pontos a negro são as entradas de resina e os pontos brancos as portas de vácuo. A imagem da esquerda não apresenta controlo, enquanto que a da direita apresenta um controlo em malha fechada. É notória a diferença e torna-se evidente o interesse da utilização deste tipo de metodologia de controlo.

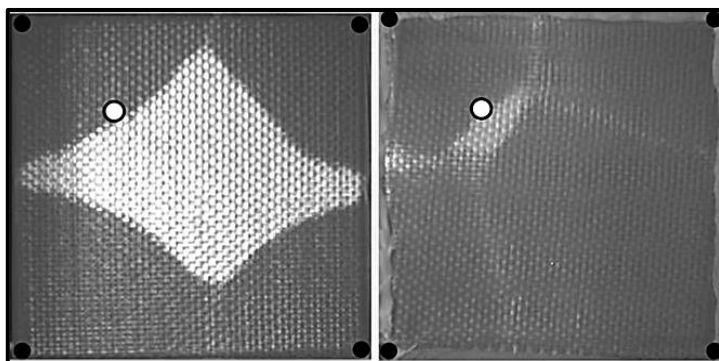


Figura 30 – Exemplo de aplicação do controlo em malha fechada; Lado esquerdo: sem controlo; Lado direito: com controlo (Alms *et al*, 2011)

❶ Variáveis de Controlo

As várias investigações analisadas remetem para um tipo de controlo binário, que define simplesmente a abertura ou fecho das válvulas do sistema de admissão da resina. A esta estratégia alia-se o objetivo de minimizar uma função custo, ou seja, a distância à porta de vácuo.

❷ Sensores e Atuadores

Tendo mais uma vez como referência a informação proveniente de investigações alusivas à implementação de controlo em malha fechada em processos de infusão a vácuo, verificou-se que o equipamento experimental utilizado é de modo geral equivalente ao representado na Figura 31.

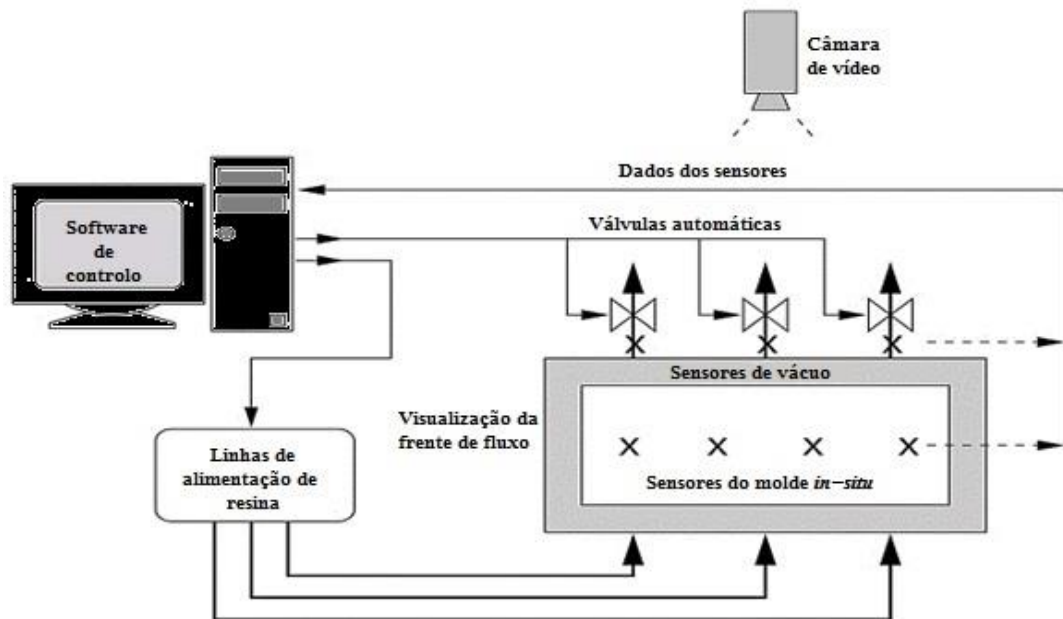


Figura 31 – Processo automatizado com sistema de controlo visual (Bickerton, et al. 2001)

Na Tabela 7 encontram-se enumerados os componentes eletrónicos mais preponderantes num sistema desta natureza.

Tabela 7 – Componentes eletrónicos e função (Bickerton *et al*, 2001)

Componente	Função
Sensores de pressão	Medir a pressão ambiente, a pressão de vácuo e a pressão à entrada do molde
Sensores de temperatura	Medir temperatura do ambiente e da resina
Computador	Executar o programa de controlo
Câmara	Obtenção da frente de fluxo da resina
Electroválvulas	Abrir e fechar as entradas e saídas da resina
Bomba de vácuo	Produção de vácuo

CAPÍTULO 4

SISTEMA LABORATORIAL DE INFUSÃO A VÁCUO

4.1 REQUISITOS

O sistema laboratorial de infusão a vácuo, ou simplesmente SLIV, é de extrema importância para a realização deste projeto, pois funciona como plataforma para a execução de todos os estudos que se revelarem como necessários.

Pretende-se verificar qual a influência de diversas variáveis na evolução da frente de fluxo, nomeadamente, a inclinação da mesa de infusão, a altura dos reservatórios da resina, o caudal de entrada na infusão e a variação da pressão à entrada e à saída da infusão (Oliveira, Pina e Silva, 2015).

Posto isto, o SLIV tem que ser dotado das seguintes capacidades:

- Mesa com um grau de liberdade de rotação, com sistema de controlo da sua inclinação;
- Sistema de controlo individual da altura de cada reservatório de resina;
- Electroválvulas para controlo de caudal de resina;
- Sistema de controlo da pressão de vácuo;
- Sistema de visão artificial para deteção da frente de fluxo;
- Interface gráfica para integrar todos os sistemas.

4.2 PROJETO ESTRUTURAL

A instalação dos vários subsistemas do SLIV foi realizada sobre uma estrutura modular existente no laboratório, sendo a organização pretendida a mostrada na Figura 32. Sistemas adicionais, como o computador e os controladores de altura, inclinação e das electroválvulas são colocados nas mesas auxiliares (Oliveira, Pina e Silva, 2015).

-
- | | |
|------------------------|--------------------------------------|
| (1) Webcams | Visão artificial (posição) |
| (2) Mesa basculante | Controlo da inclinação |
| (3) Potes de resina | Controlo da altura dos reservatórios |
| (4) Mesas auxiliares | |
| (5) Atuadores lineares | |
| (6) Roldanas | |
-

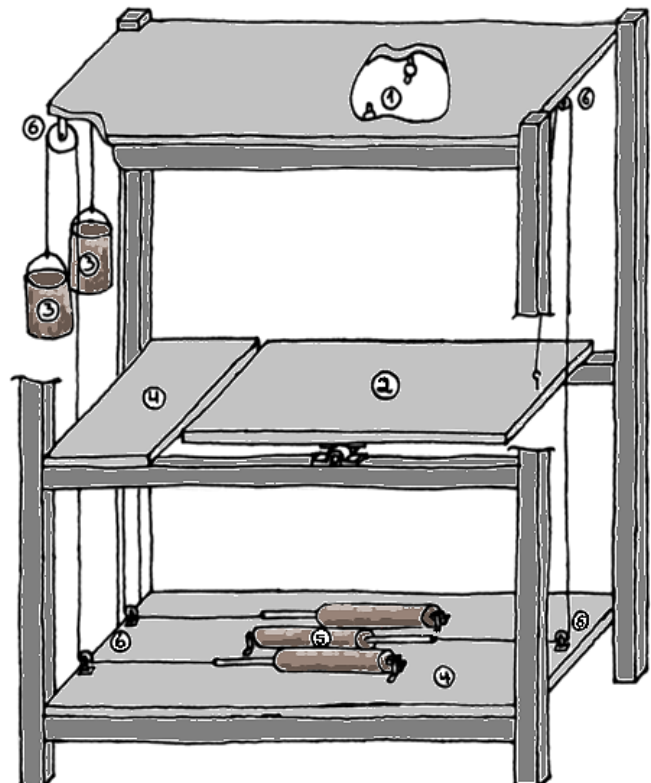


Figura 32 – Projeto SLIV. Baseado em (Oliveira, Pina e Silva, 2015)

4.3 INSTRUMENTAÇÃO

4.3.1 DESCRIÇÃO GERAL

A ideia fulcral é que exista um computador central, onde os vários subsistemas de controlo e aquisição de dados se conectem por via de um protocolo de comunicação apropriado. Cada subsistema de controlo apresenta uma estrutura em malha fechada, o que os torna autónomos. Desta forma é possível fazer uma separação entre a programação de baixo nível (subsistemas) e a programação de alto nível (manipulação de dados e controlo executados no computador central), ou seja, existe um controlador mestre e vários escravos.

Além dos sistemas a construir, também são utilizados outros sistemas auxiliares, nomeadamente a alimentação elétrica (baterias), o computador com *Matlab*⁷ e a bomba de vácuo variável, Figura 33.

Embora não se pretenda apresentar uma avaliação muito detalhada do processo de construção e implementação dos subsistemas, nas próximas secções serão abordadas algumas particularidades referentes aos mesmos.



Figura 33 – Bomba de vácuo variável

4.3.2 SISTEMA DE INCLINAÇÃO DA MESA E ELEVÇÃO DOS RESERVATÓRIOS

Devido às semelhanças dos controladores aqui utilizados determinou-se que ambos seriam integrados no mesmo sistema embebido (*arduino*⁸) e, portanto, o controlo dá-se na mesma caixa. Os componentes utilizados estão ilustrados na Figura 34, sendo o fluxo de informação representado pela direção das setas.



Figura 34 – Sistema de controlo da altura e inclinação (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

⁷ *Matlab* - <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

⁸ *Arduino* - www.arduino.cc

No interior da caixa existe um sistema interface de potência, para acionamento dos atuadores, controlado pelo *arduino* que, por sua vez, executa ordens de carácter manual ou automático (Silva, Oliveira e Pina, 2016).

Para cada sistema existem três botões de controlo sendo o de baixo que selecciona se está em modo “automático” ou “manual”. No primeiro caso, as ordens são enviadas diretamente pelo computador através de uma comunicação do tipo série. No segundo caso, são os dois botões de cima da caixa que controlam a alimentação (“*on-off*”) e o sentido de funcionamento (“*up-down*”) (Silva, Oliveira e Pina, 2016).

4.3.3 VÁLVULAS DE CONTROLO DE CAUDAL

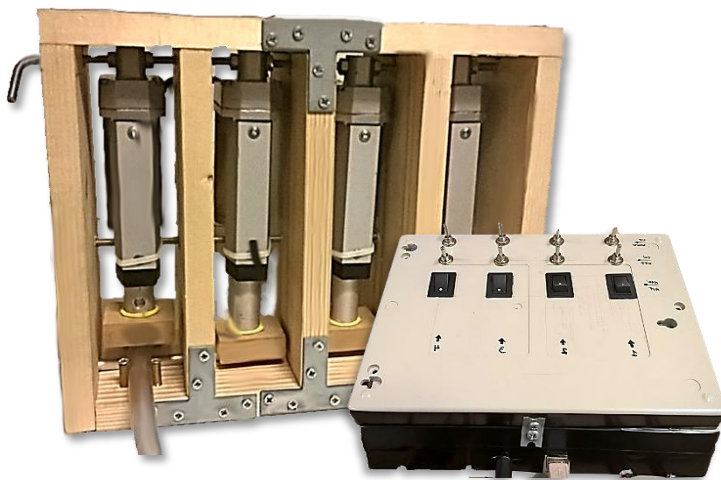


Figura 35 – Válvulas de controlo de caudal e caixa de controlo (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

As válvulas de controlo de caudal têm como principal função a abertura ou fecho do tubo ou mangueira por onde flui o caudal de resina. Em determinadas condições também poderá funcionar como estrangulador variável, possibilitando assim um controlo da pressão à saída da válvula.

O *design* é compacto e foi desenvolvido de forma a obter-se um controlo rápido e eficaz do fluxo através do tubo de admissão.

Torna-se óbvio que neste tipo de aplicações nunca se poderiam utilizar electroválvulas comuns pois, devido à cura da resina, a cada infusão realizada ter-se-ia uma válvula danificada. Tal como mostrado na Figura 35, este problema é contornado através da compressão ou expansão do próprio tubo que transporta a resina.

Do ponto de vista do controlo, e à semelhança do sistema descrito no tópico anterior, aqui também existe um conjunto de atuadores lineares a ser controlado por um circuito embebido, por intermédio de uma interface de potência.

No tipo de funcionamento pretendido (“*on-off*”) não há realimentação de qualquer variável de estado, mas existe um sistema de segurança para o controlo da força de cada atuador, Figura 36. Basicamente o sistema faz um *bypass* à ordem de controlo, sendo esta cumprida até que a força atinja o limite máximo. Desta forma, a estrutura das válvulas é salvaguardada e são impedidas sobrecargas de corrente no próprio atuador (Silva, Oliveira e Pina, 2016).

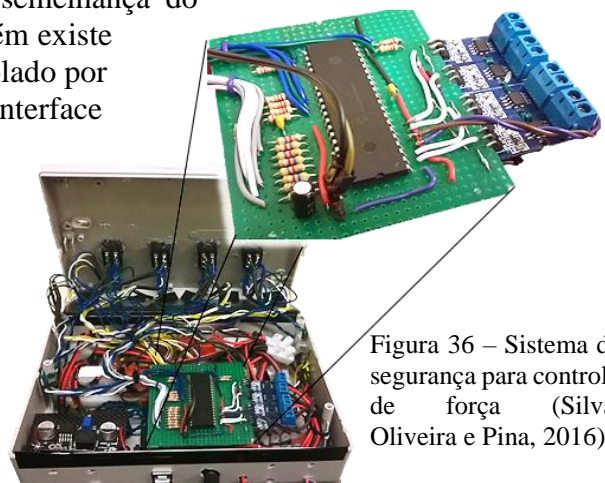


Figura 36 – Sistema de segurança para controlo de força (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

Refira-se ainda que, para fins de modelação, estas válvulas não têm uma atuação instantânea. **A velocidade ronda os 5 mm/s e o curso é de aproximadamente 15mm.**

4.3.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS

As condições atmosféricas têm de uma certa influência num processo de infusão a vácuo, nomeadamente a pressão atmosférica, a temperatura e a humidade relativa do ar. Possivelmente, as duas últimas são as que têm maior relevância, pois apresentam um intervalo de variação maior, influenciando as propriedades da resina (Silva, Oliveira e Pina, 2016).

O sistema de aquisição integra um *arduino* e dois sensores: um para medição da pressão e temperatura e outro para a medição de humidade e temperatura, Figura 37. A comunicação entre os sensores e o *arduino* é do tipo série e dá-se segundo um barramento I²C⁹. Relativamente à comunicação do *arduino* com o computador, também é do tipo série, e, como o sistema se refere a uma aquisição de dados, apenas existe fluxo de dados num sentido, ao contrário do que acontecia nos tópicos anteriores.

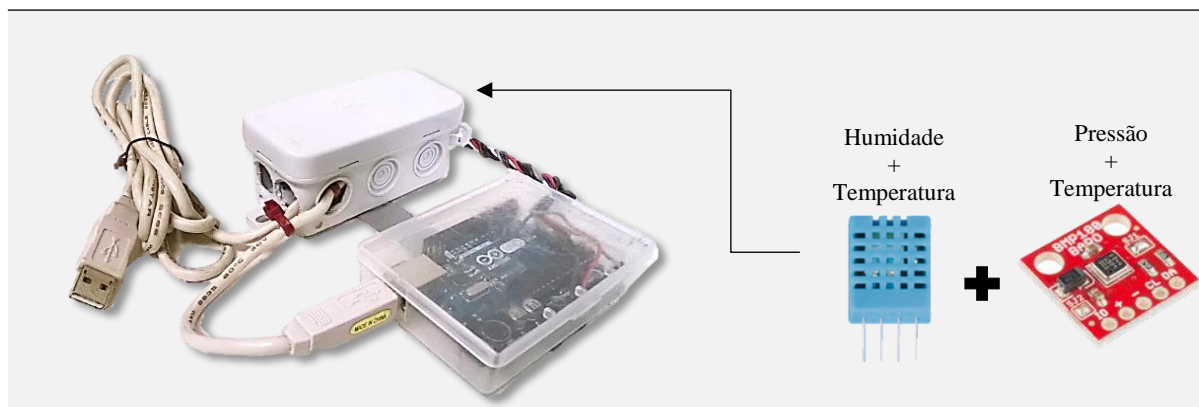


Figura 37 – Sistema de aquisição das condições atmosféricas. Baseado em (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

4.3.5 SISTEMA DE MEDIÇÃO DO DIFERENCIAL DE PRESSÃO

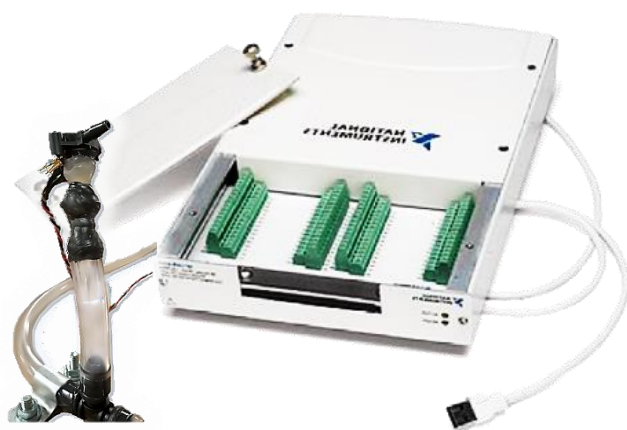


Figura 38 – Sistema de medição do diferencial de pressão (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

O diferencial de pressões é o responsável pela existência de escoamento de resina e resume-se à obtenção das pressões de entrada e saída da infusão.

Para realizar a medição, o sensor é colocado num tubo vertical, Figura 38, garantindo, desta forma, a existência de uma almofada de ar entre a resina e o corpo do sensor de pressão. Este facto é de extrema importância, porque o fluido não pode, em condição alguma, entrar no interior do sensor (Silva, Oliveira e Pina, 2016).

A aquisição do sinal é realizada pela medição da tensão, através de uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*¹⁰ e a comunicação com o computador é do tipo série por porta USB.

⁹ I²C - *Inter-Integrated Circuit*: barramento usado para conetar periféricos de baixa velocidade

¹⁰ *National Instruments* - <http://portugal.ni.com/>

4.4 SISTEMA DE VISÃO ARTIFICIAL

4.4.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA FÍSICO

❶ Escolha do Fluido e Corante

Na fase inicial do projeto, devido aos custos envolvidos na compra de resina, determinou-se que seria usado um outro fluido, que fosse barato e com propriedades não muito díspares das da resina. O fluido escolhido foi o óleo vegetal alimentar.

Do ponto de vista da deteção seria agora necessário encontrar um corante que impusesse um bom contraste nas imagens adquiridas. Inicialmente usou-se um corante preto, utilizado normalmente em infusões deste tipo, e o resultado obtido foi o mostrado na Figura 39. Analisando a imagem, verifica-se que o meio fibroso funciona como filtro e, portanto, a combinação entre fluido e corante tem que possuir uma homogeneidade suficiente para que tal não aconteça.

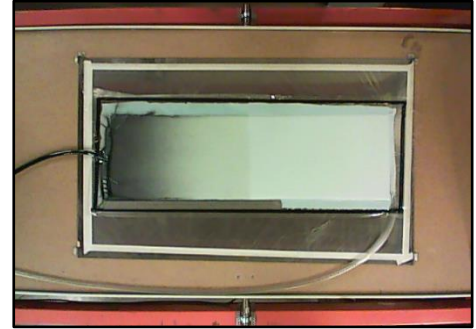


Figura 39 – Primeira Infusão (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

Realizaram-se vários testes com corantes no óleo alimentar, mas os resultados não foram satisfatórios. Na Figura 40 estão identificados três exemplos de infusão, sendo notório que a filtragem é inevitável. As setas pretas identificam a posição da frente de fluxo.

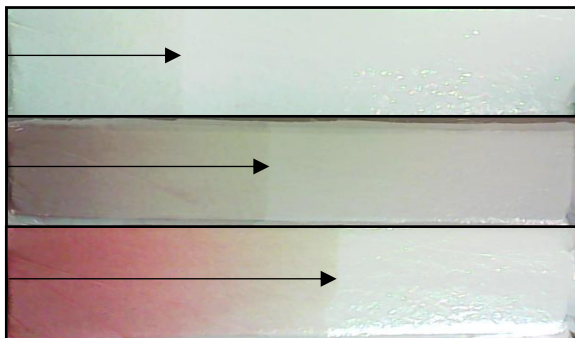


Figura 40 – Deteção da frente de fluxo. Cima: sem corante; Meio: com óxido de ferro; Baixo: com corante alimentar.

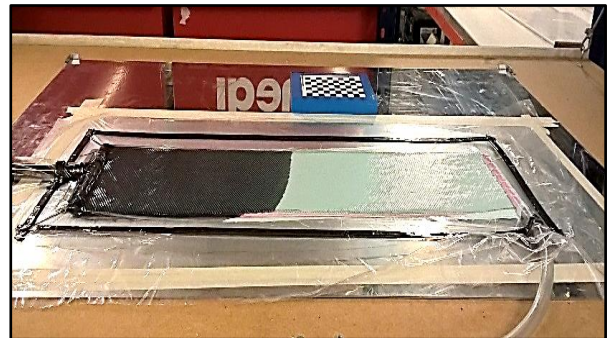


Figura 41 – Infusão de resina com corante preto (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

Após algum trabalho na identificação da frente de fluxo, constatou-se que era possível detetar a resina, inclusive sem corante; no entanto os filtros digitais aplicados no tratamento de imagem teriam de variar no tempo e, mesmo assim, a deteção seria muito sensível a sombras.

Posteriormente repensaram-se os procedimentos experimentais, minimizaram-se os desperdícios e a resina (sem o endurecedor para não ocorrer cura) passou a ser o fluido de teste. Com o corante apropriado os resultados revelam-se como positivos, Figura 41.

❷ Reflexos

Os reflexos de luz são reconhecidos como zonas de luminosidade intensa, que se sobrepõem a qualquer outra “imagem”. Por esse motivo são um problema a ter em foco e a solução passa por colocar umas placas translúcidas (utilizadas para difundir a luz) sobre a zona de infusão. Desta forma é possível detetar a frente de fluxo sem qualquer interferência por reflexo de luz ambiente (Silva, Oliveira e Pina, 2016).

4.4.2 DETECÇÃO DA FRENTE DE FLUXO

Para a obtenção da frente de fluxo é necessário executar uma série de ações relacionadas com a aquisição, o tratamento de imagem e a detecção da frente de fluxo. De seguida são identificados os procedimentos de cada uma destas fases.

① Aquisição de Imagem

CALIBRAÇÃO DA CÂMARA

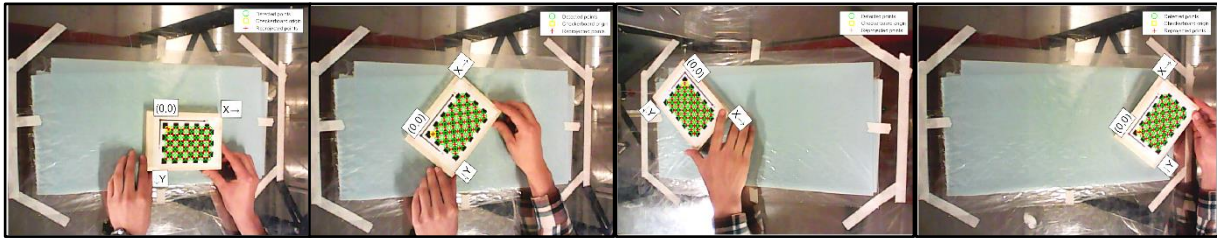


Figura 42 – Procedimento de obtenção dos parâmetros de afinação da câmara

Devido à forma ovalizada das lentes da câmara, ocorre uma distorção na imagem, que se torna mais evidente à medida que nos afastamos do centro da mesma. Esta distorção induz erros na detecção da posição real da frente de fluxo e, portanto, tem que ser prevista.

Para o efeito é utilizada a *Single Camera Calibration App* do *matlab*, que através da colocação de uma *checkerboard* em várias posições, Figura 42, calcula os parâmetros de afinação (Silva, Oliveira e Pina, 2016).

Na Figura 43 está representado o mapa tridimensional que o *matlab* cria para estimar os parâmetros de distorção em função da posição, orientação e distância da placa relativamente à câmara.

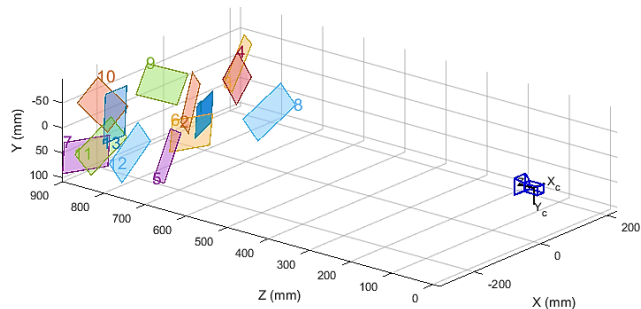


Figura 43 – Mapa 3D das posições e orientações da placa relativamente à câmara

REGIÃO DE INTERESSE (ROI)



Figura 44 – Janela de detecção (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

Após a correta obtenção da imagem torna-se necessário verificar em que zona da mesma se situa a infusão, para limitar a área da imagem a tratar. A esta zona dá-se o nome de região de interesse (ROI).

Para a obtenção automática da ROI criou-se uma janela de detecção, Figura 44, que é colocada sobre a zona de infusão, antes de se iniciar a mesma. As coordenadas são obtidas por detecção da cor azul presente na janela (Silva, Oliveira e Pina, 2016).

PERSPETIVA

No caso da mesa se encontrar inclinada, a deteção não é realizada em verdadeira grandeza, implicando, assim, uma mudança da perspetiva da imagem de acordo com o ângulo de inclinação. Ângulo esse que pode ser obtido por comunicação com o sistema de controlo da mesa ou por meio de uma *checkerboard*, Figura 45, fixada na mesa de forma a ser captada pela câmara (Silva, Oliveira e Pina, 2016).



Figura 45 – *Checkerboard* para deteção do ângulo da mesa

② Tratamento de Imagem

Após a aquisição, o primeiro passo é transformar a imagem para uma escala de cinzentos, Figura 46.

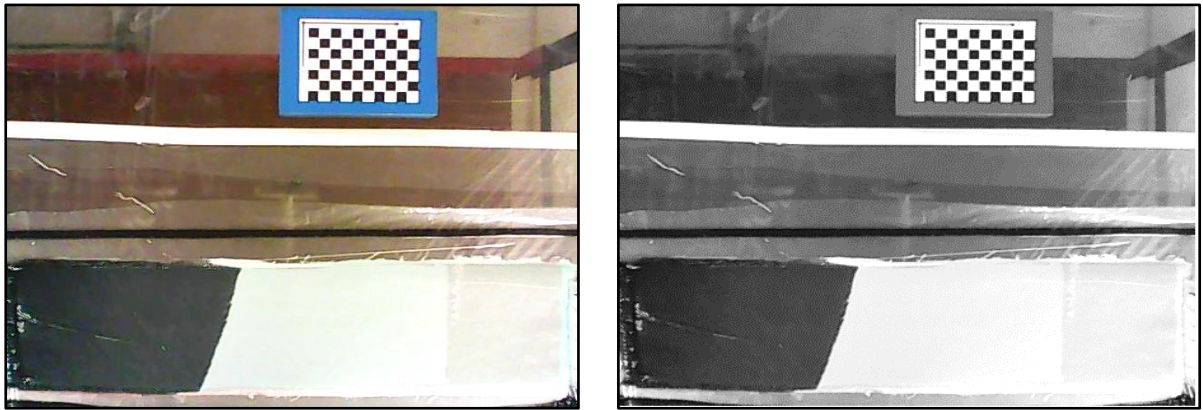


Figura 46 – Transformação em escala de cinzentos

De seguida executa-se uma segmentação da ROI, que transforma a imagem numa estrutura binária (preto=0 e branco=1). A Figura 47 mostra a evolução deste processo.

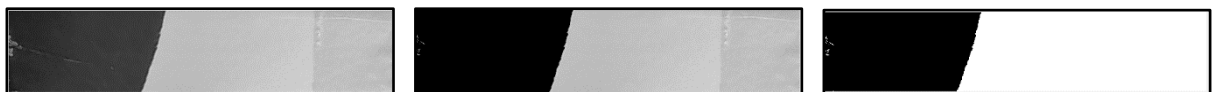


Figura 47 – Transformação em imagem binária. Esquerda: ROI; Centro e Direita: imagem em formato binário

③ Deteção da Frente de Fluxo

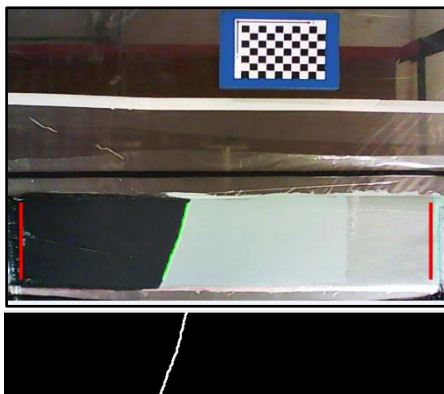


Figura 48 – Deteção da frente de fluxo

Antes da deteção realiza-se uma filtragem de ruído, através de uma erosão seguida de uma dilatação da zona branca. Esta ação elimina pequenas imperfeições existentes na imagem tratada. Posteriormente é executada uma deteção de contornos, ou seja, zonas onde existem transições bem definidas, Figura 48 (baixo).

Por fim verifica-se a posição do valor máximo em cada linha da matriz de imagem, ou seja, encontra-se a zona branca. Posto isto, obtém-se um vetor de posições da frente de fluxo e o resultado é o ilustrado a verde na Figura 48 (cima).

4.4.3 PROPRIEDADES GERAIS DE DETEÇÃO

Na Tabela 8 estão identificadas as propriedades mais relevantes do sistema de visão artificial elaborado. Relativamente à sensibilidade aos reflexos, verificou-se que se encontra intrinsecamente dependente das condições atmosféricas no exterior, o que obriga a cuidados ligeiros em dias de sol mais intenso (Silva, Oliveira e Pina, 2016).

Tabela 8 – Propriedades de deteção do sistema de visão artificial (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

Propriedades	Tempo de Amostragem	Resolução	Sensibilidade às Sombras	Sensibilidade aos Reflexos
Valor	≈ 1 Segundo	1 mm/pixel	Baixa	Médio/Baixo

4.5 INTERFACE GRÁFICA

A interface gráfica foi realizada em *matlab* e tem como principal objetivo a integração de todos os sistemas existentes no SLIV. O seu *design* foi pensado tendo como focos essenciais, a facilidade de controlo e a exposição de toda a informação pertinente.

Na Figura 49 estão identificadas as várias funcionalidades da interface do SLIV.

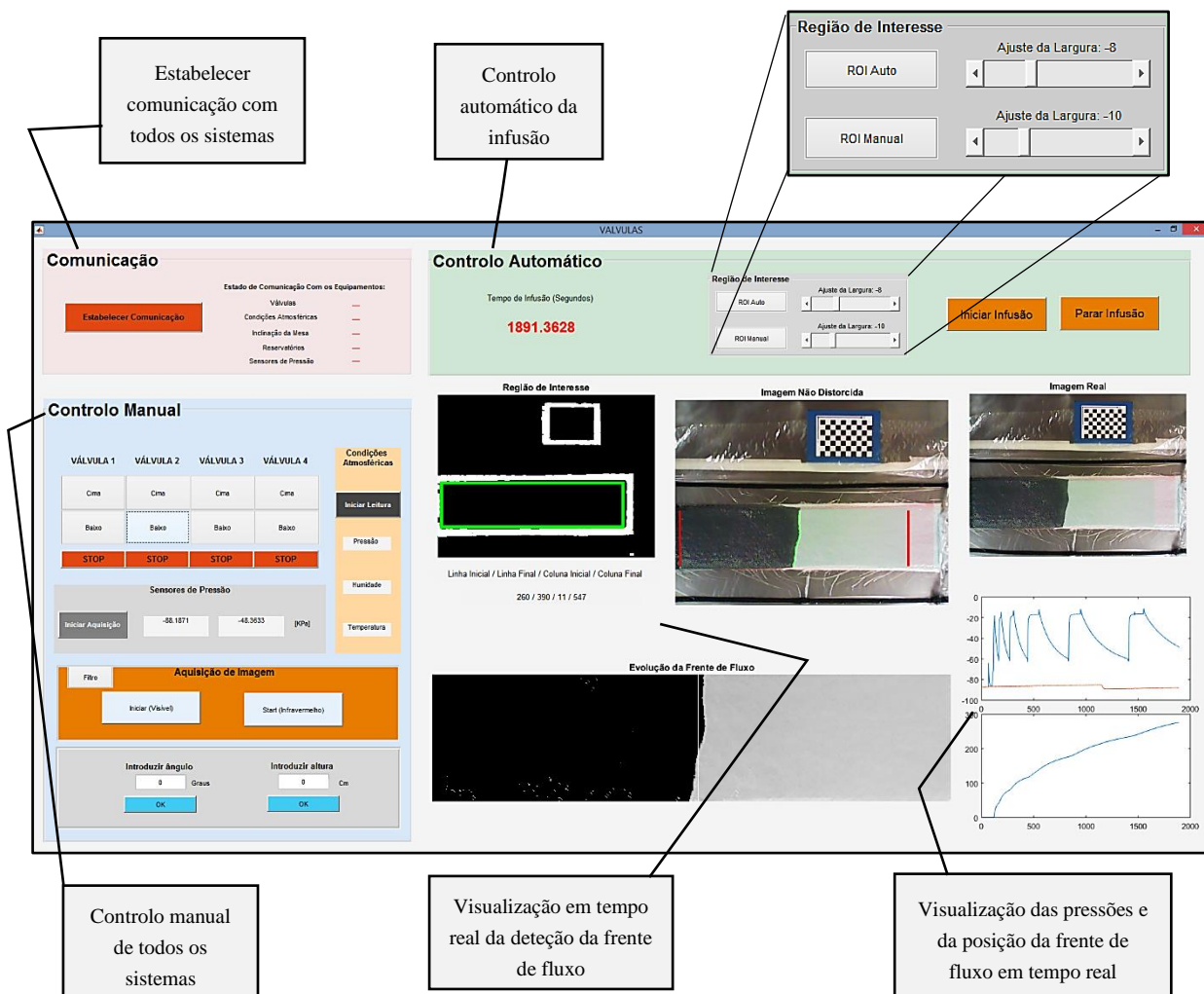


Figura 49 - Interface gráfica (Silva, Oliveira e Pina, 2016)

4.6 SÍNTESE DO SISTEMA SLIV

Na Figura 50 está representado um diagrama com todas as relações existentes entre os vários subsistemas do SLIV. As setas indicam o sentido do fluxo de informação ou da influência, podendo existir apenas num sentido ou em ambos os sentidos.

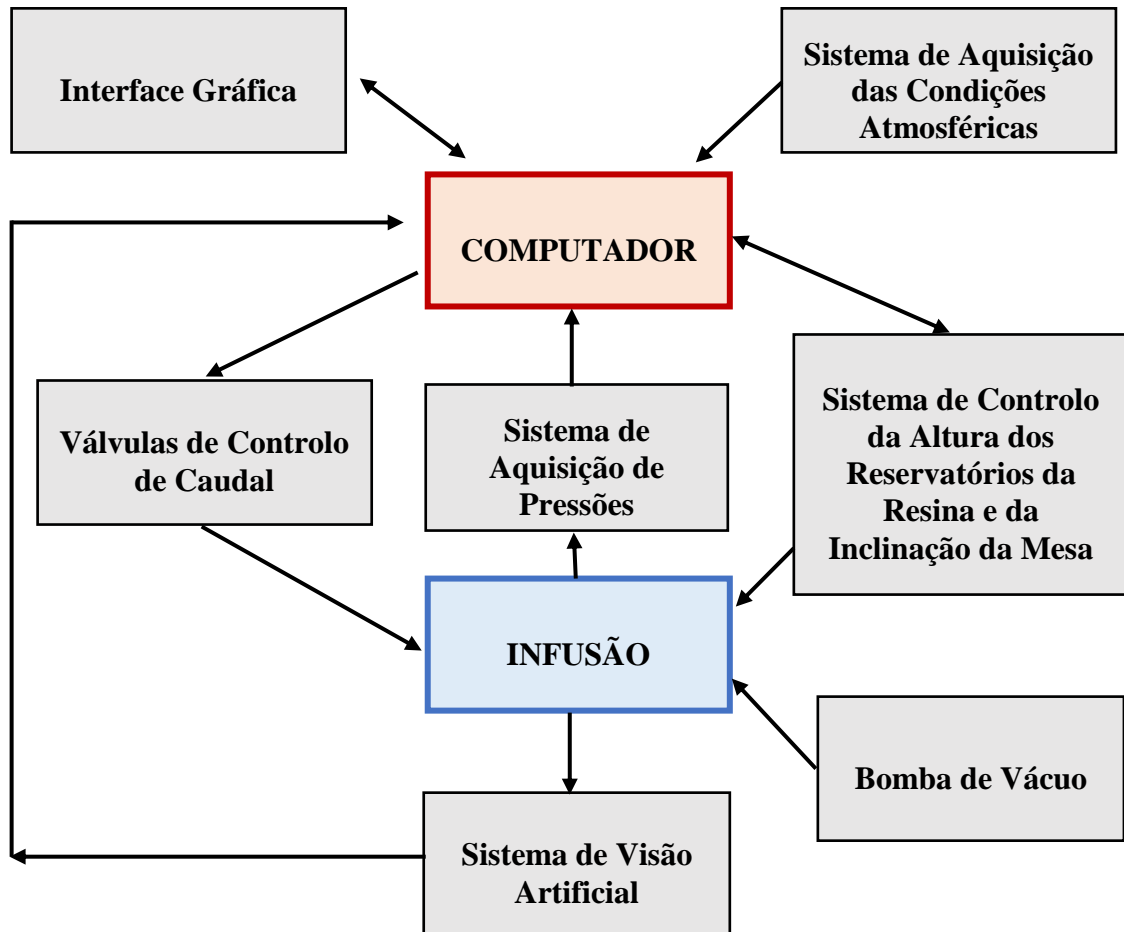


Figura 50 – Intercomunicação entre os diversos subsistemas do SLIV

CAPÍTULO 5

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL





As várias temáticas abordadas no decorrer deste projeto requerem um vasto número de ensaios experimentais e, embora apresentem diferenças evidentes entre si, a base de preparação dos mesmos mantém-se inalterada para reduzir as variações entre experiências.






Neste capítulo pretende-se identificar os componentes integrantes, o porquê da sua utilização e, acima de tudo, descrever as estratégias e procedimentos adotados.

5.1 COMPONENTES USADOS

Em 1.4.3 foram já mencionados alguns elementos tipicamente utilizados em processos de infusão a vácuo, no entanto, na Tabela 9 são apresentados todos os que foram necessários para a execução do procedimento experimental neste projeto.

Tabela 9 – Componentes de infusão e respetiva função

Componente		Função
<i>Tape</i> de vedação		Impedir entrada de ar na zona de infusão
Tubo helicoidal		Distribuição da resina na entrada e do vácuo na saída
Válvula manual		Controlo manual do caudal de resina ou do fluxo de ar extraído
‘T’ para ramificação de caudal		Ramificação de uma linha de alimentação de resina ou de vácuo (utilizado nos sensores de pressão e nos tubos helicoidais)

Tubo		Transporte da resina e do ar extraído
Película permeável		Permite a transferência de resina da camada de distribuição para o meio fibroso
<i>Peel Ply</i>		Facilita a desmoldação da peça infundida
Saco de vácuo		Isola a zona de infusão do meio ambiente
Camada de distribuição		Facilita o escoamento da resina ao longo do meio fibroso, diminuindo o tempo de infusão

5.2 CONFIGURAÇÕES ADOTADAS

Inicialmente realizou-se um levantamento de alguns fatores sobre os quais se definiram padrões que permaneceram constantes ao longo do projeto. A configuração definida é de elevada importância porque todos os dados obtidos experimentalmente dependem inevitavelmente dessas condições pré-configuradas.

De seguida apresentam-se as definições de maior relevo:

❶ Fibra de Vidro

A fibra de vidro escolhida apresenta uma estrutura do tipo descontínua com orientação aleatória, Figura 51. Para se obter uma espessura pós-compressão próxima dos 3 mm são utilizadas seis camadas de fibra com 400 g/m².

De forma a minimizar-se o efeito das *fast-tracking* e a obter-se uma boa margem de comprimento para se realizarem os testes, definiu-se que as dimensões dos tecidos de fibra são: **15 cm × 60 cm (largura × comprimento)**.

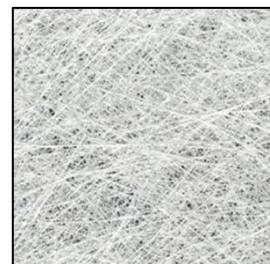


Figura 51 - Fibra de vidro com disposição aleatória

2 Camada de Distribuição

O objetivo inicial era que a infusão não apresentasse camada de distribuição. No entanto, quando se iniciaram os testes experimentais, verificou-se que devido à elevada viscosidade da resina (sem catalisador) e à baixa permeabilidade do meio fibroso, o tempo de infusão era elevadíssimo.

Para contornar este problema utilizou-se uma camada de distribuição, de forma a favorecer o avanço da frente de fluxo. A adição desta camada influencia o tipo de modelação a realizar, mas como medida de simplificação determinou-se que todo o estudo se realiza desprezando o efeito da mesma.

3 Tubo Helicoidal / Manga de Infusão

Neste momento já é sabido da necessidade de colocação de componentes distribuidores na entrada e saída da infusão. O tubo helicoidal é a opção mais evidente devido ao seu custo e abundância. No entanto, com o decorrer da infusão, em torno do mesmo é criada uma bolsa de resina que, posteriormente, influencia a evolução da pressão quando a electroválvula é fechada, Figura 52.

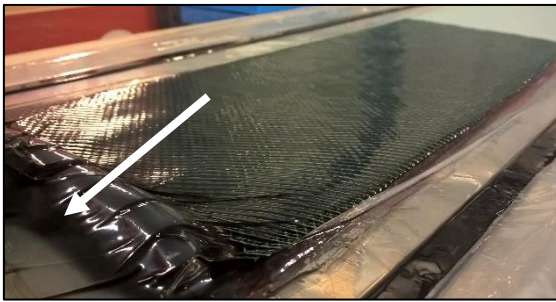


Figura 52 – Bolsa de resina



Figura 53 – Manga de infusão. Lado esquerdo: exterior. Lado direito: interior

Para evitar esta situação, em vez do convencional tubo helicoidal utiliza-se uma manga de infusão, Figura 53.

4 Pressão à Entrada da Infusão

No decorrer do projeto deverão realizar-se testes, cuja pressão de entrada tem que apresentar valores muito abaixo do que se consegue obter apenas com o sistema de elevação dos reservatórios de resina. A solução encontrada passa pela construção de um sistema que permite a aplicação de vácuo nos reservatórios de forma a controlar-se a diferença de pressões.

Na Figura 54 está representado um reservatório que permite a aplicação do efeito pretendido. O recipiente com o tubo mais longo armazena a resina, enquanto, que o outro permanece vazio, funcionando apenas como reservatório de vácuo. Quanto aos tubos superiores, um é para a resina, outro para a aplicação de vácuo e o último, se necessário, permite a entrada de ar para diminuição do vácuo.



Figura 54 – Reservatório de resina com sistema para aplicação de vácuo

5 Processo de Limpeza

Para facilitar o desenrolar dos testes experimentais definiu-se que a resina não seria sujeita ao período de cura, portanto não se adiciona o endurecedor. Esta medida dificulta muito o processo de limpeza, porque a resina entra em contacto direto com a chapa de infusão.

A solução encontrada, excecionalmente para a execução destes testes, passa pela colocação de um saco de vácuo entre a chapa de infusão e o conjunto dos componentes utilizados. Desta forma a resina nunca entra em contacto com o exterior e o processo de limpeza torna-se extremamente simples.

5.3 PROCESSO DE PREPARAÇÃO

Em 1.4.3 foi exposto um procedimento experimental típico para a execução de uma infusão. No entanto, este projeto apresenta particularidades que lhe são subjacentes. Na Figura 55 mostra-se, de forma sequencial, o processo de preparação dos testes experimentais.

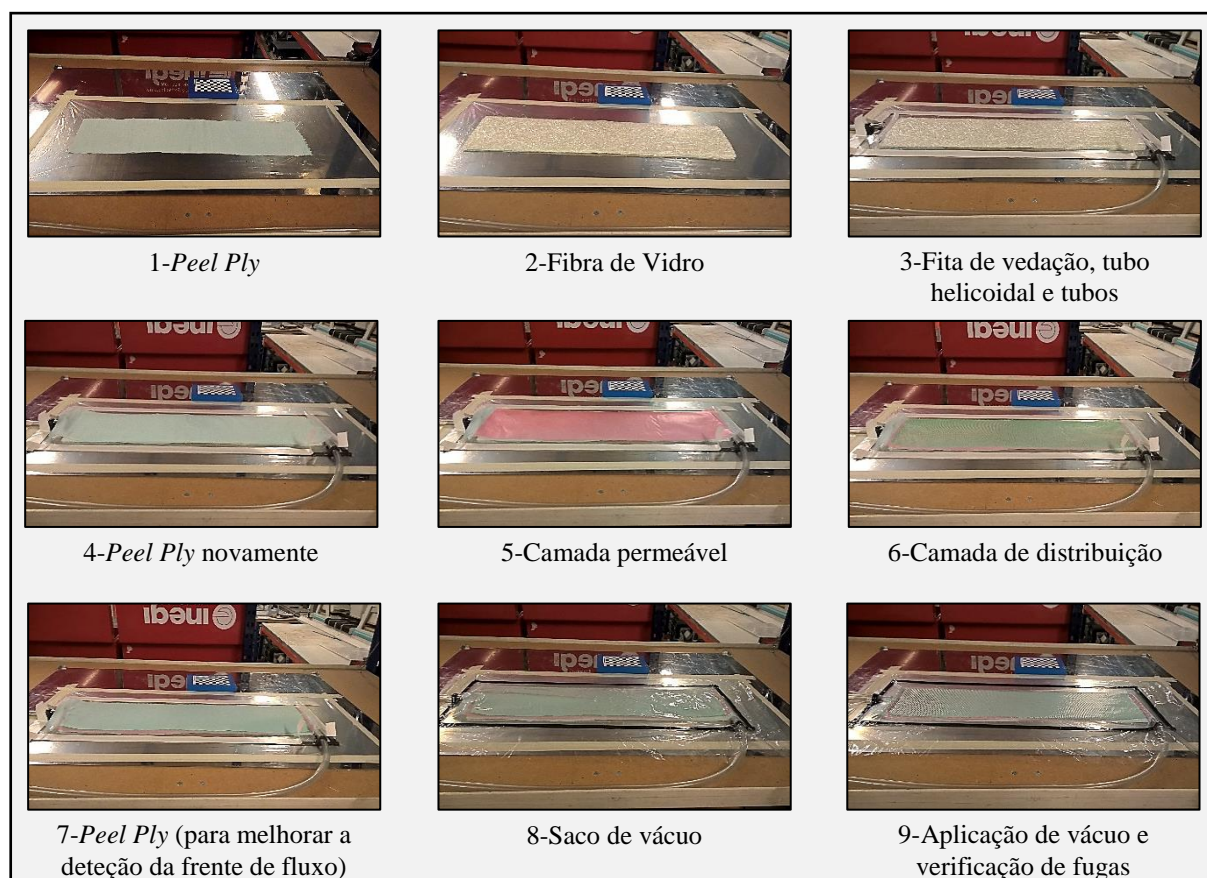


Figura 55 – Processo de preparação da infusão

CAPÍTULO 6

MODELAÇÃO DINÂMICA

6.1 INTRODUÇÃO

6.1.1 A MODELAÇÃO

No presente projeto, pretende-se obter um modelo numérico que seja capaz de reproduzir as dinâmicas envolvidas num processo de infusão a vácuo, conjugadas com as dinâmicas do sistema laboratorial anteriormente apresentado.

A sua obtenção é indispensável, pois permite a compreensão dos fenómenos físicos e, numa fase mais avançada, será integrado em metodologias de controlo do sistema. Embora esta seja a finalidade fulcral, é espectável que, em ambiente de simulação, este modelo seja capaz de representar de forma apreciável o processo em questão. Sendo assim, existe um compromisso de qualidade do modelo, entre o que se considera como suficiente, para a conceção de controladores (modelos normalmente mais simples), e o que se considera como necessário, para a realização de simulações do processo.

O capítulo divide-se essencialmente em duas secções: modelação de infusões a vácuo com pressão de entrada constante e modelação de infusões a vácuo com pressão de entrada variável. O primeiro caso refere-se ao procedimento comumente utilizado na indústria, enquanto, que o segundo engloba as estratégias que possibilitam o controlo do sistema.

6.1.2 ESTRATÉGIAS DE MODELAÇÃO

De acordo com o que foi dito no tópico anterior, torna-se necessária uma definição das estratégias de modelação e das simplificações que lhes estão subjacentes.

Considerando que o sistema é do tipo ‘caixa cinzenta’ - que já existe um conhecimento prévio da representação matemática de alguns fenómenos físicos envolvidos - definiu-se que as bases de modelação, pré-estabelecidas, seriam os modelos de escoamento (com e sem compactação do meio fibroso) apresentados em 3.1.1.

De seguida apresenta-se a adaptação dos modelos de escoamento às condições definidas no atual projeto e enumeram-se as simplificações adotadas.

❶ Modelo de Escoamento com Campo de Pressões Linear [Sem Compactação]

A equação fundamental é a equação de *Darcy* (3.15), sendo os parâmetros (K , ϕ e μ) constantes e referentes à zona da frente de fluxo:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{K}{\phi} \right]_{x=x_{ff}} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (6.1)$$

$\frac{dP}{dx}$ é calculado por derivação da equação (3.16) em ordem a x :

$$\frac{dP}{dx} = \frac{(P_v - P_e)}{x_{ff}} \quad (6.2)$$

À partida este modelo não representará corretamente o escoamento, porque não inclui o estado de compactação do meio fibroso; no entanto, será considerado como base de modelação.

② Modelo de Escoamento com Campo de Pressões Não Linear [Com Compactação]

Partindo da equação fundamental (6.1), $\frac{dP}{dx}$ será calculado através da aproximação polinomial do campo de pressões descrita pela equação (3.29):

$$P(\alpha) = a \cdot \alpha^2 + (P_v - P_e - a) \cdot \alpha + P_e$$

A equação (6.1) tem que ser função de α (referencial invariante no tempo). Sendo $\alpha = \frac{x}{x_{ff}}$, então:

$$\frac{dx_{ff}}{dt} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{K}{\emptyset} \right]_{\alpha=1} \cdot \left[\frac{dP}{d\alpha} \right]_{\alpha=1} \cdot \frac{1}{x_{ff}} \quad (6.3)$$

Derivando a equação do campo de pressões (3.29) em função de α e substituindo $\alpha = 1$,

$$\frac{dP(\alpha)}{d\alpha} = 2 \cdot a \cdot \alpha + (P_v - P_e - a) \xrightarrow{\alpha=1} \frac{dP(\alpha)}{d\alpha} = P_v - P_e + a \quad (6.4)$$

‘ a ’ é um coeficiente determinado experimentalmente e que representa a não linearidade do campo de pressões. Este modelo será usado sempre que o modelo sem compactação não seja suficiente para descrever os fenómenos físicos.

③ Simplificações Consideradas na Modelação

1. Embora a bomba de vácuo apresente um intervalo (*on-off*) de funcionamento, considera-se que a pressão de vácuo é constante, $P_v \approx -89kPa$ (os valores de pressão usados correspondem à pressão diferencial relativamente à pressão atmosférica);
2. A permeabilidade K e a porosidade \emptyset são função do estado de compressão do meio fibroso na frente de fluxo. Sendo a pressão de vácuo constante, então estes parâmetros também são considerados constantes;
3. A histerese de compactação é desprezada, assim como o efeito da camada de distribuição sobre as propriedades do escoamento;
4. Na aproximação (6.4), $\frac{dP}{d\alpha}$ assemelha-se ao gradiente de pressão sem influência de compactação, diferindo apenas no acréscimo do coeficiente ‘ a ’. Desta forma, é possível tratar o problema como se não apresentasse compactação e, depois, adicionar simplesmente o coeficiente ‘ a ’;
5. Não é adicionado endurecedor à resina durante a execução dos testes; portanto, não existe cura e a viscosidade mantém-se constante (modelo de cura da resina é desprezado);
6. Entre o reservatório e a entrada da infusão há perda de carga, dependente da velocidade do fluido e do comprimento e rugosidade do tubo; no entanto, esta não é modelada.

6.2 MODELAÇÃO DA INFUSÃO A VÁCUO COM PRESSÃO DE ENTRADA CONSTANTE

6.2.1 ESTRUTURA DO PROCESSO DE MODELAÇÃO

No diagrama que se segue estão representados, de forma sequencial, todos os passos relevantes ao processo de modelação de uma infusão contínua. O início da modelação é indicado pela caixa com contorno verde, enquanto, que o final é assinalado com contorno vermelho. As caixas com fundo laranja representam os fenómenos, cuja existência foi constatada no decorrer do processo de modelação e que vieram a influenciar o desenrolar do mesmo.

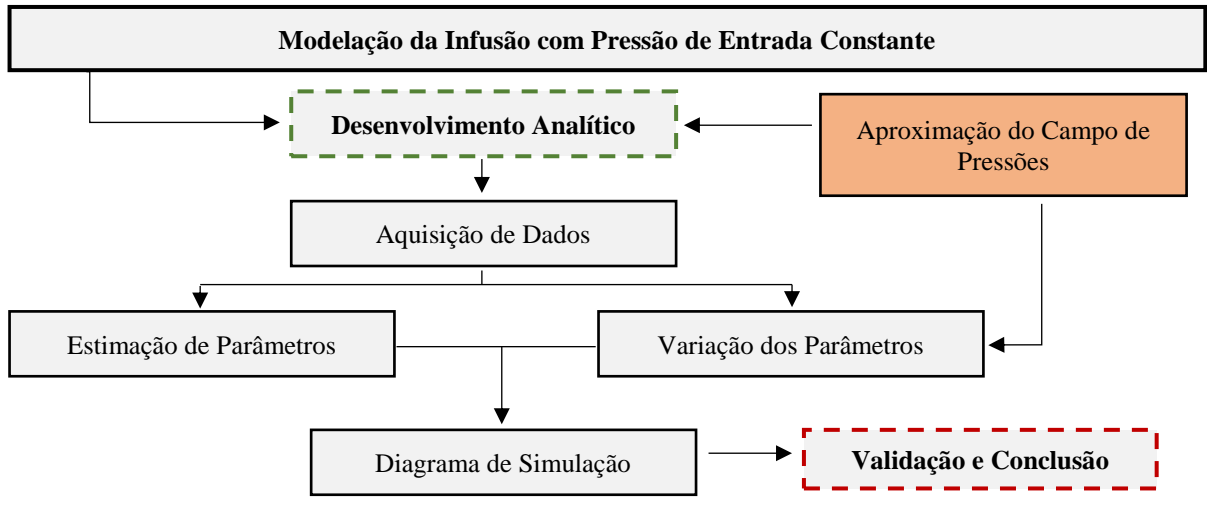


Figura 56 – Diagrama de modelação da infusão contínua

6.2.2 DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO

Pretende-se obter a equação que descreve os dados da posição da frente de fluxo em função do tempo, obtidos experimentalmente. Para tal, parte-se do princípio que não existe compactação do meio fibroso e realiza-se a seguinte integração da lei de Darcy:

$$\begin{aligned}
 & \boxed{\frac{dx}{dt} = -\frac{K}{\mu\phi} \cdot \frac{dp}{dx}} \\
 & \Leftrightarrow \int_{x_0}^{x_{ff}} 1 dx^2 = - \int_{t_0}^t \int_{P_e}^{P_v} \frac{K}{\mu \cdot \phi} dp dt \Leftrightarrow \int_{x_0}^{x_{ff}} x \cdot dx = - \int_{t_0}^t \frac{K}{\mu \cdot \phi} (P_v - P_e) dt \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow \frac{x_{ff}^2}{2} - \frac{x_0^2}{2} = \frac{K}{\mu \cdot \phi} (P_e - P_v)(t - t_0) \Leftrightarrow x_{ff} = \sqrt{2 \left(\frac{K}{\mu \cdot \phi} (P_e - P_v)(t - t_0) + \frac{x_0^2}{2} \right)} \Leftrightarrow \\
 & x_{ff} = \sqrt{2 \cdot \frac{K}{\mu \cdot \phi} \cdot \Delta P \cdot (t - t_0) + x_0^2} \quad (6.5)
 \end{aligned}$$

No caso em estudo considera-se $t_0 = 0$ e $x_0 = 0$, portanto:

$$x_{ff} = \sqrt{2 \cdot \frac{K}{\mu \cdot \phi} \cdot \Delta P \cdot \sqrt{t}} \quad (6.6)$$

Sendo assim, a posição da frente de fluxo varia em ordem ao tempo, segundo uma função raiz quadrada, com constante $\sqrt{2 \cdot \frac{K}{\mu \cdot \phi} \cdot \Delta P}$.

6.2.3 AQUISIÇÃO DE DADOS E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

O procedimento experimental utilizado na aquisição de dados é muito simples: as pressões de vácuo e de entrada são constantes ($P_e \approx -8$; $P_v \approx -89$; $\Delta P \approx 81$ kPa) e a infusão evolui de forma contínua (válvulas totalmente abertas).

Os dados obtidos são da posição ao longo do tempo, sendo w o parâmetro a estimar (parâmetro de estimação). As equações que relacionam as variáveis são:

$$x_{ff} = w \cdot \sqrt{t} \quad (6.7)$$

$$w = \sqrt{2 \cdot \frac{K}{\mu \cdot \phi} \cdot \Delta P} \quad (6.8)$$

No Gráfico 2 está representada a evolução da frente de fluxo medida experimentalmente e a evolução aproximada, obtida pela estimação do parâmetro w através do método dos mínimos quadrados.

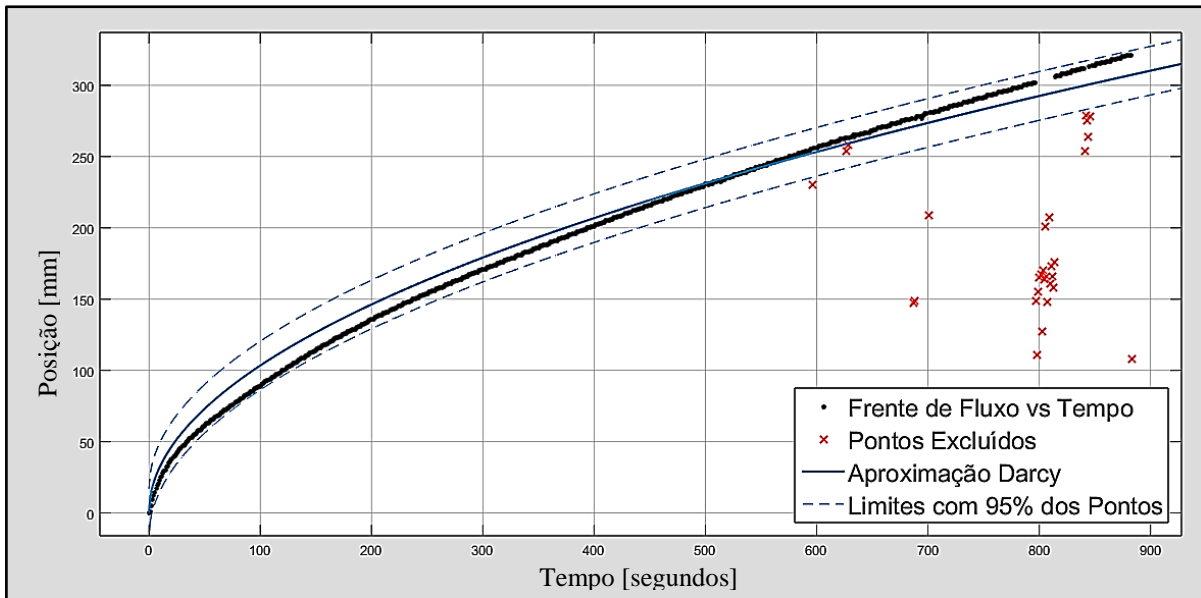


Gráfico 2 – Aproximação Darcyana e dados experimentais da frente de fluxo em função do tempo de infusão

Informação da estimação do parâmetro:

$$w = 10.34$$

$$R^2 = 0.9881$$

$$\text{Limites de 95\%: } (10.31, 10.37)$$

No entanto, o parâmetro de estimação w é dependente de ΔP . Em 6.1.2 considerou-se que as propriedades K , ϕ e μ são constantes, portanto:

$$w = \sqrt{2 \cdot C \cdot \Delta P}$$

$$C = \frac{K}{\mu \cdot \phi} = \frac{w^2}{2 \cdot \Delta P} \quad (6.9)$$

Como a diferença de pressão é constante e igual a 81 kPa:

$$C = \frac{10.34^2}{2 \cdot 81} = 0.656 \left[\frac{mm^2}{kPa \cdot s^2} \right]$$

onde C é o parâmetro das propriedades do escoamento.

NOTA: O valor obtido para o parâmetro das propriedades do escoamento C , refere-se a uma estimação executada com dados de apenas um teste experimental. Na secção seguinte é realizado um pequeno estudo relativo à variação do parâmetro.

6.2.4 VARIAÇÃO DO PARÂMETRO DAS PROPRIEDADES DO ESCOAMENTO

Devido à natureza estocástica do processo, de seguida é realizado um estudo de variação relativamente a dois cenários: variação ao longo da própria infusão e variação entre testes experimentais.

Para o efeito, são usados dados de quatro infusões contínuas, sendo também incluída no estudo de variação entre infusões, a informação de testes realizados noutras condições.

6.2.4.1 VARIAÇÃO DURANTE A INFUSÃO

O cálculo do parâmetro das propriedades do escoamento C , ao longo da infusão, realiza-se da seguinte forma:

$$C_i = \frac{x_i^2 - x_{i_0}^2}{(t_i - t_{i_0}) \cdot 2 \cdot (P_{e_i} - P_{v_i})} \quad (6.10)$$

onde,

i – índice dos elementos dos vetores de dados (posição, tempo e pressão)
 i_0 – índice no momento em que a válvula é aberta

Considerando que, x_{i_0} e t_{i_0} são nulos (válvula abre no instante inicial e na posição zero), as curvas obtidas são as representadas no Gráfico 3. Analisando o mesmo, verifica-se que o parâmetro das propriedades do escoamento (C) tende a diminuir com o desenrolar do teste experimental, sendo exceção a infusão 3 (origem técnica, possivelmente).

A variação do parâmetro ao longo da infusão é uma evidência da utilização da camada de distribuição e da sua não consideração no modelo de escoamento, tornando o processo menos previsível. Ainda assim, tal como mencionado em 6.1.2 - Estratégias de Modelação, o seu efeito será desprezado para não tornar o modelo final mais complexo.

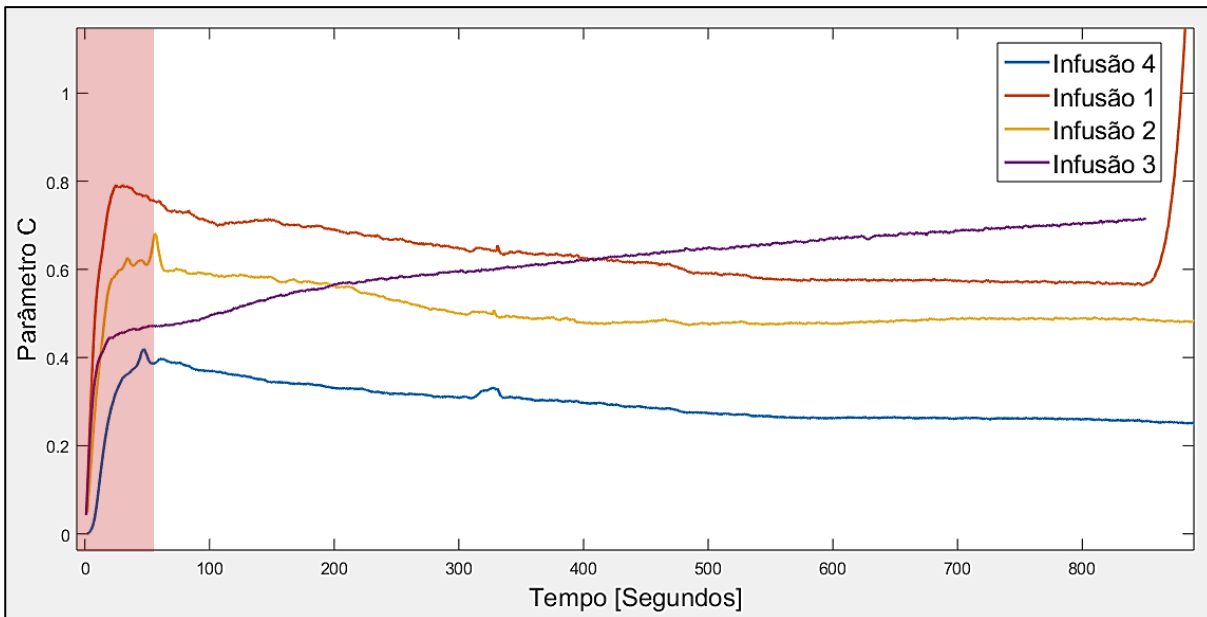


Gráfico 3 – Variação do parâmetro das propriedades de escoamento C ao longo da infusão

No Gráfico 4 apresentam-se as máximas variações relativamente ao valor estimado, no decorrer de cada infusão. Para a realização dos cálculos desprezaram-se os dados dos instantes iniciais, zona a vermelho no Gráfico 3, porque a pressão de entrada ainda não se encontra estabilizada.

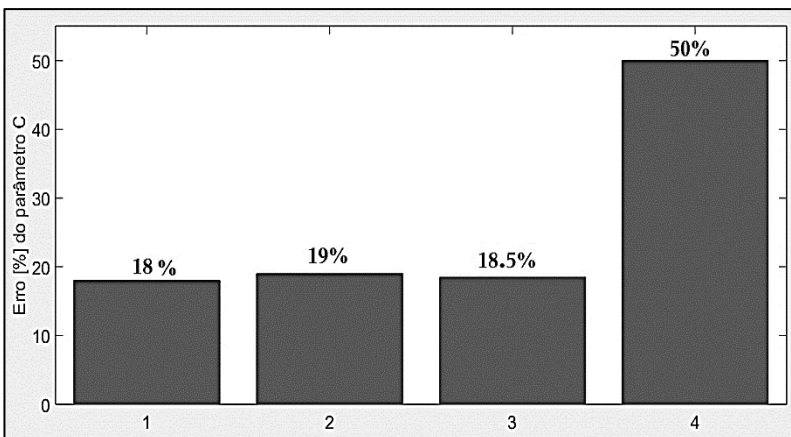


Gráfico 4 – Variação máxima do parâmetro C no decorrer da infusão

A tendência da máxima variação, ao longo de cada infusão, ronda os 18 a 20%, à exceção do ensaio 4, em que ocorreram variações na casa dos 50%.

Este pode ser um indício de uma anomalia técnica, portanto, a sua inserção nos cálculos pode induzir erros na obtenção dos resultados de variação entre testes experimentais.

6.2.4.2 VARIAÇÃO ENTRE TESTES EXPERIMENTAIS

Na realização do estudo de variação do parâmetro das propriedades do escoamento C, o número de amostras é importante. Assim, os resultados obtidos com apenas 4 infusões apresentariam uma relevância estatística muito baixa. A forma mais evidente de contornar este problema seria através da realização de mais infusões com pressão de entrada constante; no entanto, evitou-se esta situação devido à dificuldade de preparação das mesmas.

Utilizaram-se então dados de outros testes experimentais, realizados para a modelação de infusões com pressão de entrada variável, de forma a retirar informação útil para esta secção. Embora esses testes não tenham a pressão de entrada constante, ainda assim apresentam intervalos de tempo com essa característica (quando as válvulas estão abertas).

A equação (6.10) mantém-se válida para obtenção do parâmetro no decorrer da infusão, mas, nesse caso, x_{i_0} e t_{i_0} são diferentes de zero e correspondem à posição e tempo em que a válvula é aberta.

A título de exemplo, no Gráfico 5 mostra-se a evolução do parâmetro em dois momentos de abertura da válvula.

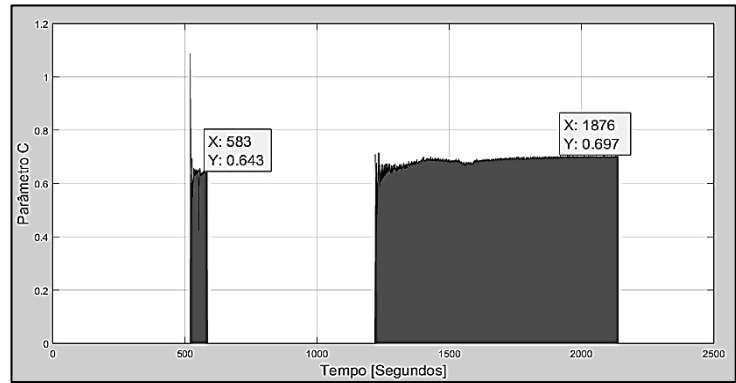


Gráfico 5 – Parâmetro C quando válvula aberta

Excluindo o ensaio 4, devido ao descrito no tópico anterior, e considerando as estimativas obtidas pelo método dos mínimos quadrados a partir dos testes em cima enunciados, obtém-se o conjunto de dados representados no Gráfico 6.

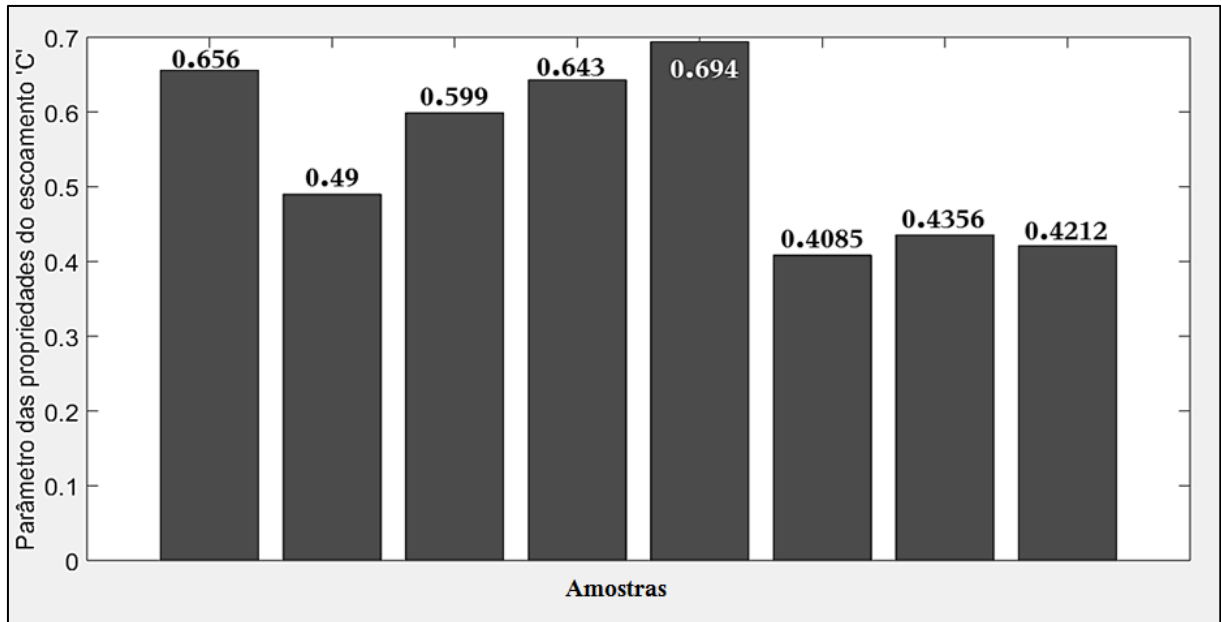


Gráfico 6 – Variação do parâmetro C das propriedades do escoamento

Realizando o estudo de variação obtêm-se os seguintes valores:

$$\text{Média } (\mu) = 0.5434$$

$$\text{Desvio Padrão } (\sigma) = 0.1170$$

Se considerarmos que as amostras seguem uma distribuição normal e gaussiana, para uma probabilidade de $\approx 95\%$, o parâmetro apresenta-se como:

$$C = \mu \pm 2 \times \sigma$$

$$C = 0.5434 \pm 0.2340 \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{kPa} \cdot \text{s}^2} \right]$$

NOTA: Em trabalhos futuros, aconselha-se a realização de mais testes experimentais de forma a aumentar o grau de confiança estatística do presente estudo.

6.2.5 INFLUÊNCIA DO CAMPO DE PRESSÕES NÃO LINEAR

Antes de mais, é necessário obter a equação de *Darcy* com o efeito do gradiente de pressões não linear, ou seja, substitui-se a equação de aproximação do gradiente de pressões (6.4), na equação de *Darcy* com referencial invariante no tempo (6.3):

$$\frac{dx_{ff}}{dt} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{K}{\phi} \right]_{\alpha=1} \cdot (P_v - P_e + a) \cdot \frac{1}{x_{ff}} \quad (6.11)$$

Integrando fica:

$$x_{ff} = \underbrace{\sqrt{2 \cdot C \cdot (P_e - P_v - a)}}_w \cdot \sqrt{t} \quad (6.12)$$

Isto significa que para estimar o parâmetro das propriedades do escoamento, C , é necessário um conhecimento prévio do coeficiente de não linearidade ' a ' do campo de pressões:

$$C = \frac{K}{\mu \cdot \phi} = \frac{w^2}{2 \cdot (P_e - P_v - a)} \quad (6.13)$$

Se ' a ' = 0, a aproximação do campo de pressões é linear e a equação (6.13) torna-se equivalente à equação (6.3) utilizada na estimação do parâmetro C nas secções anteriores. Mas se ' a ' \neq 0, o parâmetro C apresentará um valor diferente do calculado até então, ou seja, considerar que o campo de pressões é linear provoca um erro de cálculo nas propriedades do escoamento, C .

No Gráfico 7 mostra-se o erro cometido para diferentes valores do coeficiente de não linearidade ' a '. Como se pode constatar, quanto maior for a não linearidade do campo de pressões (a), maior será o erro cometido no cálculo do parâmetro C , ao considerar-se que o perfil de pressões é linear. No entanto, do ponto de vista da modelação não muda nada, o que esta análise nos mostra é que o valor de C calculado sem a influência da não

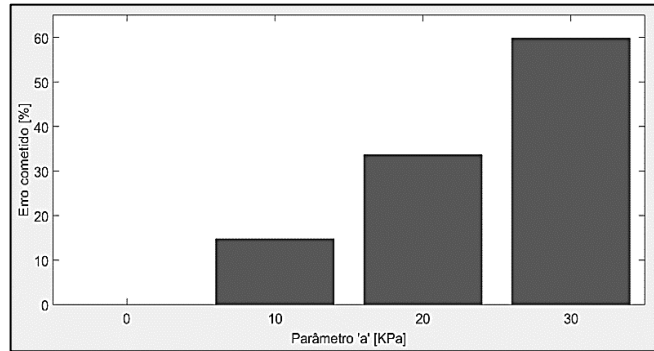


Gráfico 7 – Erro cometido não considerando o parâmetro

linearidade, não corresponde ao valor real das propriedades do escoamento, $\frac{K}{\mu \cdot \phi}$.

Posto isto, se se quiser obter o valor real de $\frac{K}{\mu \cdot \phi}$ é necessário o conhecimento prévio do coeficiente de não linearidade ' a '. Este ainda não é determinável, visto que nesta secção não foram abordadas as dinâmicas necessárias para a realização da sua estimação.

6.2.6 SIMULAÇÃO

Na Figura 57 encontra-se a estrutura do diagrama de blocos utilizado para a realização das simulações executadas em *Simulink*¹¹. As pressões de entrada e de saída da infusão são negativas, porque são obtidas através dos sensores de pressão diferencial, relativamente à pressão atmosférica (o seu valor encontra-se em kPa).

¹¹ *Simulink* - <http://www.mathworks.com/products/simulink/>

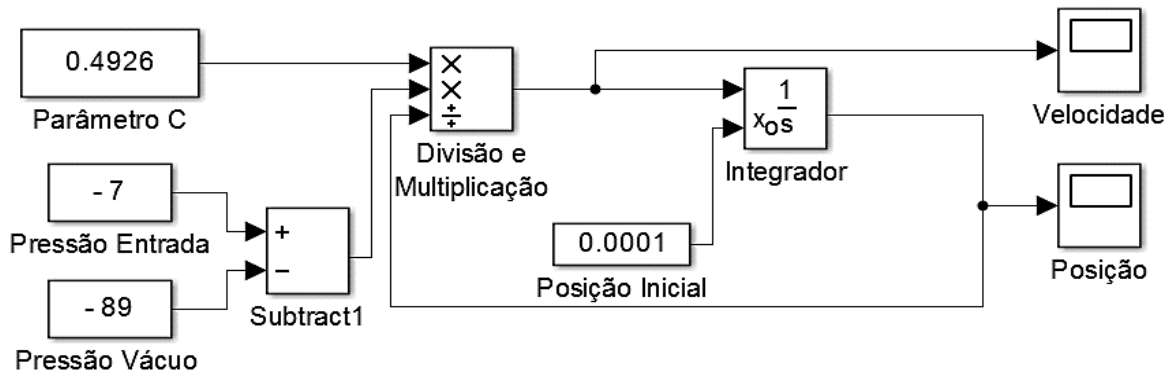


Figura 57 – Diagrama de blocos de simulação de uma infusão contínua

6.2.7 VALIDAÇÃO E CONCLUSÃO

A validação é fulcral num processo de modelação, pois culmina com a aceitação, ou não, do modelo até então trabalhado. Realizou-se mais um teste experimental para se obterem os dados de validação, sendo o resultado apresentado no Gráfico 8. Como se pode verificar, a curva experimental encontra-se próxima do limite superior, mas mantém-se dentro dos limites admissíveis. Ainda assim, nem todas as dinâmicas do processo são representadas pelo modelo determinado. Tal é perceptível devido à discrepância verificada na forma das curvas de evolução da frente de fluxo. Os valores usados nas curvas estimadas são os descritos em 6.2.4.2, ou seja:

$$C = 0.5434 \pm 0.2340 \left[\frac{mm^2}{kPa \cdot s^2} \right]$$

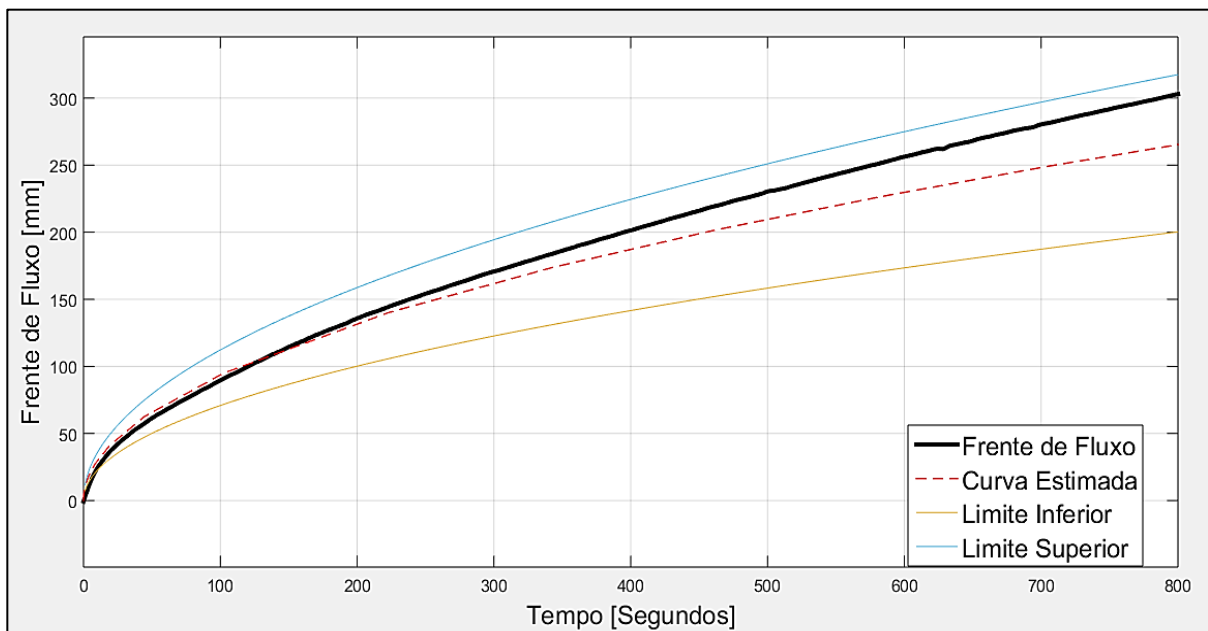


Gráfico 8 – Validação do modelo de infusão contínua considerando a posição da frente de fluxo

Realizando uma derivação das curvas de posição obtiveram-se as curvas de velocidade representadas no Gráfico 9. É notório que as diferenças não são tão evidentes; no entanto, verifica-se uma boa aproximação na fase inicial e uma oscilação entre o exterior e o interior da zona admissível, na fase final. Esta é uma questão relacionada com a resolução do sistema de visão artificial e do processo de derivação numérica, e não de uma inconsistência do modelo.

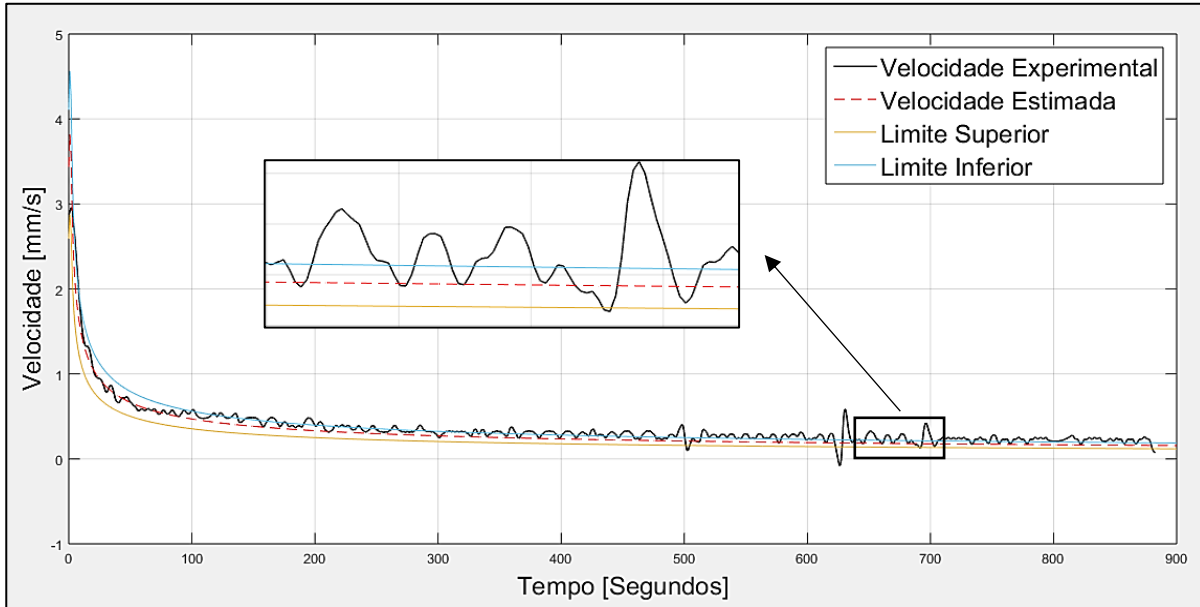


Gráfico 9 – Validação do modelo de infusão contínua considerando a velocidade da frente de fluxo

De forma a complementar a informação, no Gráfico 10 encontra-se a estimativa da velocidade para cada posição da frente de fluxo. Note-se que a 50 cm da entrada a velocidade já se encontra em valores muito baixos, ≈ 0.11 mm/s.

Do ponto de vista do controlo, esta informação é de extrema importância, pois corresponde à velocidade máxima controlável, ou seja, velocidades superiores não são atingíveis nesta posição (isto na ausência de medidas para aceleração da frente de fluxo, como a inclinação da mesa).

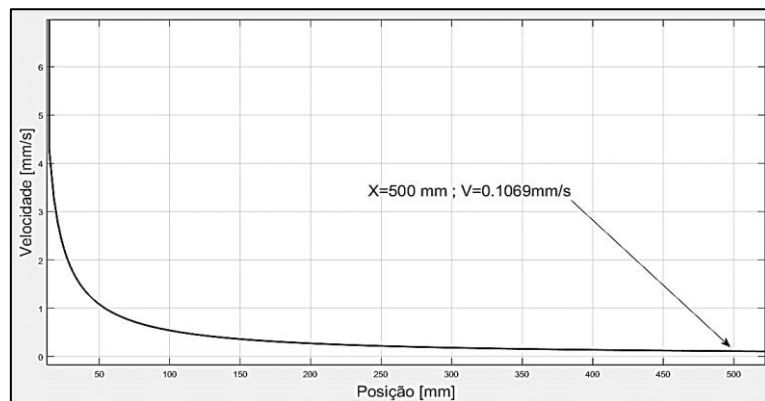


Gráfico 10 – Velocidade máxima atingível em cada posição da frente de fluxo

NOTA CONCLUSIVA:

Convém reter que o parâmetro C representa o conjunto das propriedades do fluído e do meio fibroso. No entanto, verificou-se que considerando o campo de pressões linear obtém-se um erro no seu valor final. Sendo assim, o valor de C aqui obtido, embora funcione muito bem como parâmetro de infusões que se executam de forma contínua, com $\Delta P \approx 81$ kPa ($P_e - P_v$), na realidade não corresponde ao real valor das propriedades do escoamento.

Para a realização de infusões contínuas com ΔP inferior (processo invulgar na indústria) é necessário utilizar o parâmetro C calculado nas próximas secções, que inclui os efeitos da não linearidade do campo de pressões, e que representa um valor aproximado das propriedades, $\frac{K}{\mu \cdot \phi}$. É claro que nesta situação também deverá ser incluído o coeficiente 'a' na equação do campo de pressões ao longo do escoamento.

6.3 MODELAÇÃO DA INFUSÃO A VÁCUO COM PRESSÃO DE ENTRADA VARIÁVEL

6.3.1 ESTRUTURA DO PROCESSO DE MODELAÇÃO

Na Figura 58 está representado o diagrama da estrutura do processo de modelação de uma infusão não contínua, que se encontra organizado da seguinte forma:

- Contorno verde: início da modelação;
- Fundo verde: etapa fundamental para a iniciação da modelação analítica;
- Fundo azul: os três principais tópicos da modelação do processo;
- Fundo laranja: fenómenos cuja existência foi constatada no decorrer da modelação e que influenciaram o desenrolar da mesma;
- Contorno azul: propostas de modelação;
- Contorno vermelho: final da modelação.

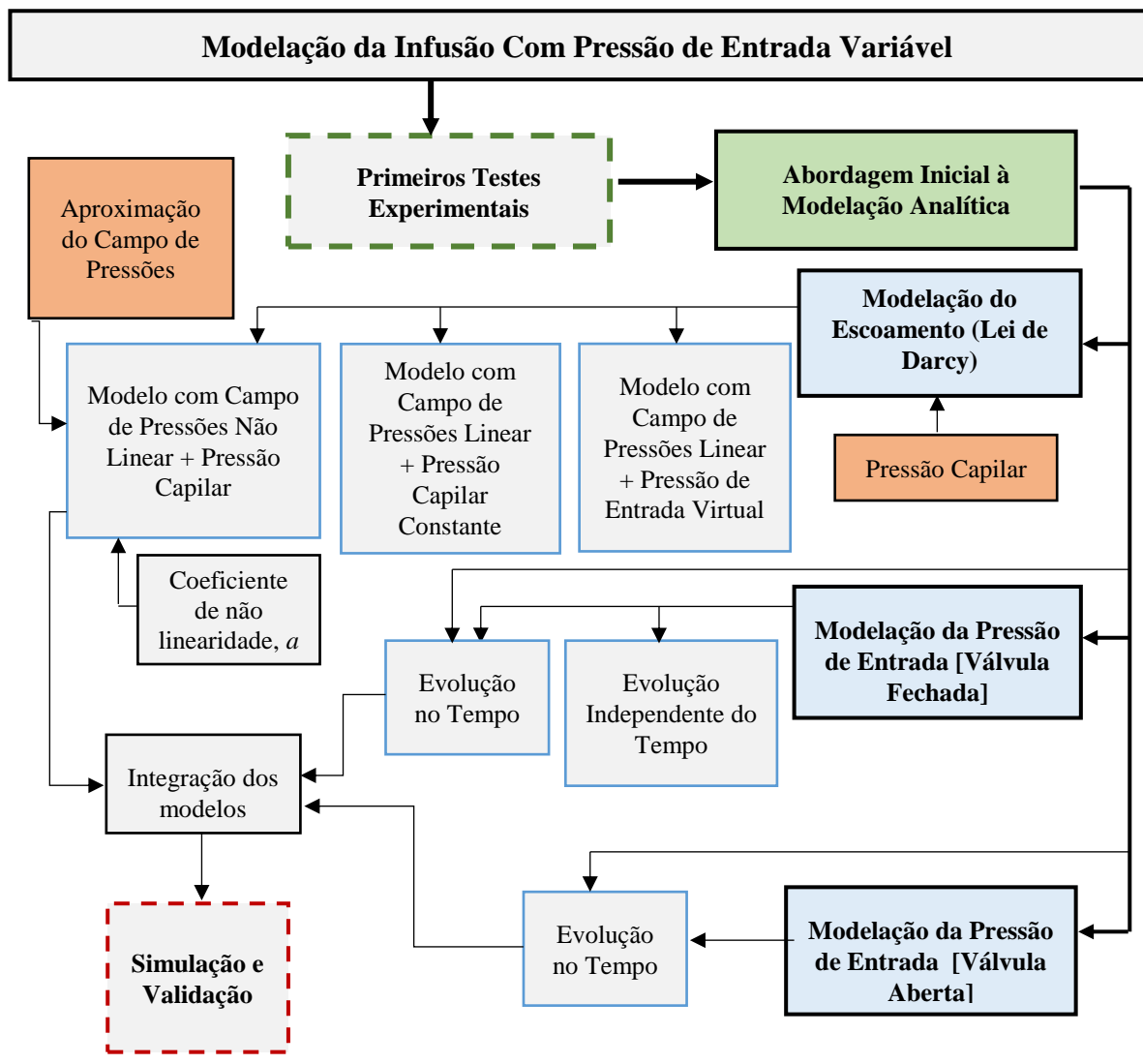


Figura 58 - Diagrama de modelação da infusão não contínua

6.3.2 ANÁLISE INTRODUTÓRIA

6.3.2.1 PRIMEIRO TESTE EXPERIMENTAL

Ainda não existe na literatura informação relevante sobre a influência da variação da pressão na admissão de resina durante um processo de infusão a vácuo. Portanto, realizou-se um teste com a abertura e fecho da válvula (3 vezes), em posições da frente de fluxo e tempos de abertura diferentes, de forma a retirar o máximo de informação quanto aos fenómenos e dinâmicas envolvidas.

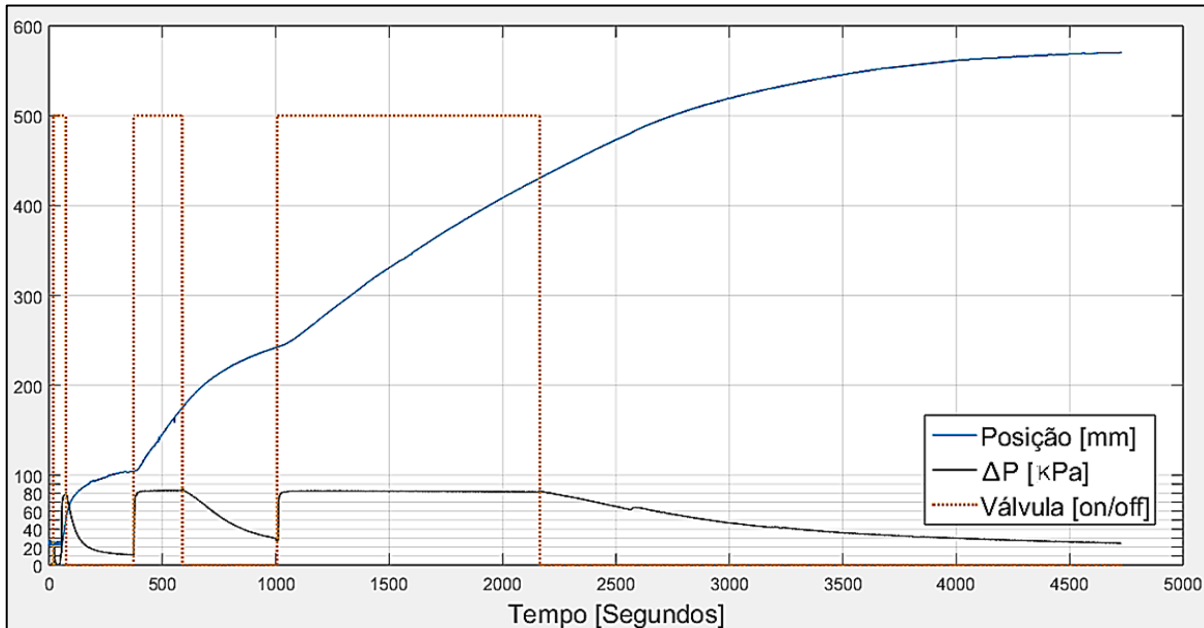


Gráfico 11 – Primeiro teste experimental com abertura/fecho da válvula

No Gráfico 11 estão apresentados os resultados obtidos e, tal como se esperava, à medida que a diferença de pressão diminuiu, a velocidade da frente de fluxo tende também a diminuir. Por outro lado, ao contrário do que se esperava, a frente de fluxo tende a parar com um valor de $\Delta P \neq 0$. Uma explicação possível é a tensão superficial do fluido, que mais à frente se comprova estar relacionada com a pressão capilar (efeito de capilaridade).

6.3.2.2 LIMITE EXPERIMENTAL DA PRESSÃO DE ENTRADA

Pretende-se determinar o valor para o qual a pressão de entrada tende após o fecho da válvula ($\frac{dx}{dt} \rightarrow 0$). No Gráfico 12 encontram-se os últimos 10000 segundos (quase 3 horas) do teste executado para a aquisição dos valores de pressão, durante dois dias, após o fecho da válvula.

O valor obtido foi $P_e \approx -81$ kPa, que corresponde a um ΔP :

$$\Delta P = P_e - P_v \approx 8 \text{ kPa}$$

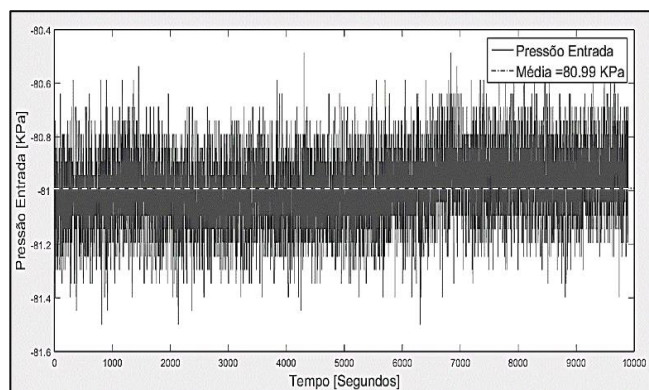


Gráfico 12 - Teste experimental para obtenção da pressão capilar quando $\frac{dx}{dt} \approx 0$

6.3.2.3 ABORDAGEM INICIAL À MODELAÇÃO ANALÍTICA

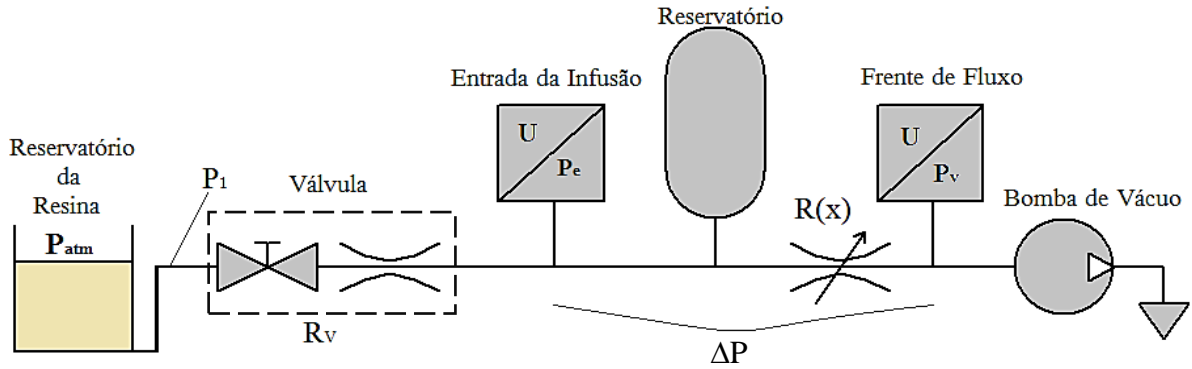


Figura 59 – Esquema do processo para iniciação da modelação do processo

Na Figura 59 encontra-se o esquema do processo de infusão a vácuo, que serve de apoio à primeira abordagem analítica de modelação. A conceção deste esquema teve em conta uma simplificação de elevada importância, correspondente à aproximação do meio fibroso pelo efeito conjugado de um reservatório de volume variável, em série com uma resistência hidráulica, também ela variável e dependente da posição da frente de fluxo, x . O reservatório inclui o comportamento do volume de resina presente no meio fibroso e depende do estado de compactação, enquanto, que a resistência variável reproduz a resistência ao escoamento no meio fibroso.

Considerando que o volume do reservatório é função da pressão na entrada:

$$V_r = f(P_e) \xrightarrow{\text{supondo que é proporcional}} P_e = S \cdot V_R \xrightarrow{\text{Diferenciando}} \frac{dP_e}{dt} = S \cdot \frac{dV_R}{dt} \quad (6.14)$$

A diferença de pressão define-se como:

$$\Delta P = P_e - P_v \xrightarrow{\text{Diferenciando, com } P_v = \text{constante}} \frac{d\Delta P}{dt} = \frac{dP_e}{dt} \quad (6.15)$$

Pela conservação de massa (com fluido incompressível):

$$\frac{dV_R}{dt} = q_{in} - q_{out} \quad (6.16)$$

O caudal de saída obtém-se com:

$$q_{out} = \frac{1}{R(x)} \cdot \Delta P \quad (6.17)$$

Substituindo a equação (6.17) na (6.16):

$$\frac{dV_R}{dt} = q_{in} - \frac{1}{R(x)} \cdot \Delta P \quad (6.18)$$

Substituindo a equação (6.14) em (6.18) e rearranjando os termos:

$$\frac{1}{S} \cdot \frac{dP_e}{dt} = q_{in} - \frac{1}{R(x)} \cdot \Delta P \Leftrightarrow \frac{dP_e}{dt} = S \cdot \left(q_{in} - \frac{1}{R(x)} \cdot \Delta P \right) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{dP_e}{dt} = S \cdot q_{in} - \frac{S}{R(x)} \cdot \Delta P \quad (6.19)$$

Realizando as restantes substituições resulta em:

$$\boxed{\frac{dP_e}{dt} = \frac{S}{R_v} \cdot (P_1 - P_e) - \frac{S}{R(x)} \cdot (P_e - P_v)} \quad (6.20)$$

onde,

- S: constante de proporcionalidade;
- P_e : pressão à entrada da infusão;
- P_v : pressão de vácuo;
- P_1 : pressão à entrada da válvula ($P_1 \approx -5 \text{ kPa}$);
- R_v : resistência hidráulica da válvula;
- $R(x)$: resistência hidráulica do meio fibroso.

Devido ao carácter binário da válvula, a sua resistência (R_v) também apresenta o mesmo comportamento, ou seja, quando a válvula é fechada, R_v tende para infinito e o termo correspondente tende para zero (dinâmica dominada pelo termo negativo do segundo membro da equação (6.20)). Por outro lado, quando a válvula é aberta, R_v tende para um valor muito pequeno e o termo correspondente apresenta um valor elevado (dinâmica dominada pelo termo positivo do segundo membro da equação (6.20)).

Obtidas as dinâmicas inerentes à pressão de entrada, aplica-se a lei de *Darcy* (modelo de escoamento) e obtém-se a evolução da frente de fluxo, Figura 60.

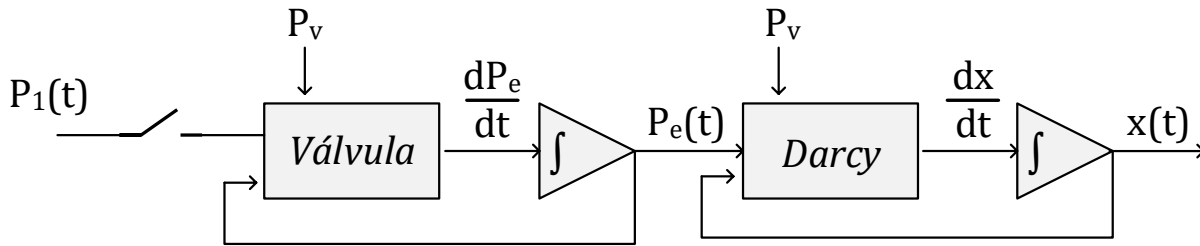


Figura 60 – Diagrama de blocos do modelo obtido

Para a obtenção do modelo descrito, a partir deste momento, o processo de modelação será dividido em três etapas fundamentais, Figura 61.

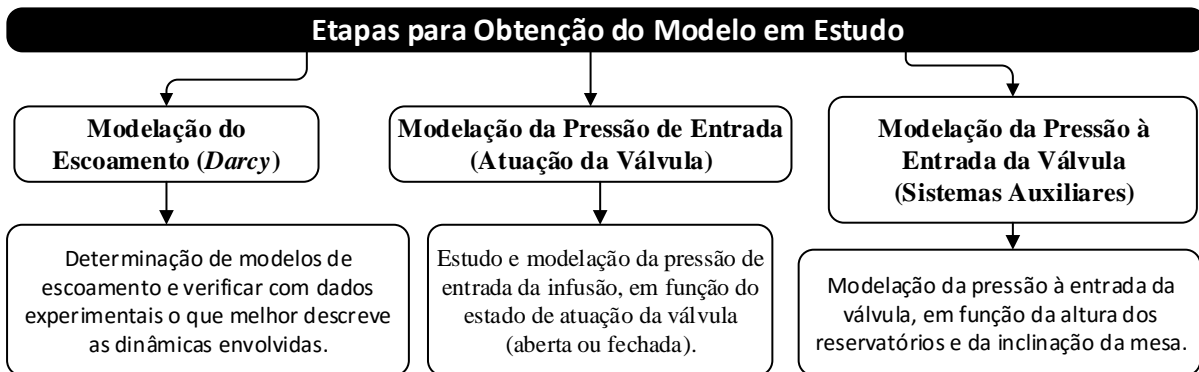


Figura 61 – Etapas de modelação para obtenção do modelo em estudo

6.3.3 MODELAÇÃO DO ESCOAMENTO UNIDIRECIONAL [LEI DE DARCY]

6.3.3.1 DESCRIÇÃO

Sabe-se de antemão que a lei de *Darcy* descreve o escoamento da resina em meios fibrosos, no entanto, a configuração adotada para o campo de pressões e própria inclusão de outros fenómenos físicos, influencia a forma como esta descreve o desenrolar do escoamento.

Nos tópicos que se seguem serão apresentadas as seguintes propostas de modelação: **modelo com campo de pressões linear**, **modelo com campo de pressões linear + pressão de entrada virtual**, **modelo com campo de pressões linear + pressão capilar** e **modelo com campo de pressões não linear + pressão capilar**. Após a exposição e análise individual será realizada uma comparação entre os modelos e os dados experimentais, Figura 62, para se determinar, posteriormente, o que melhor representa as dinâmicas do processo.

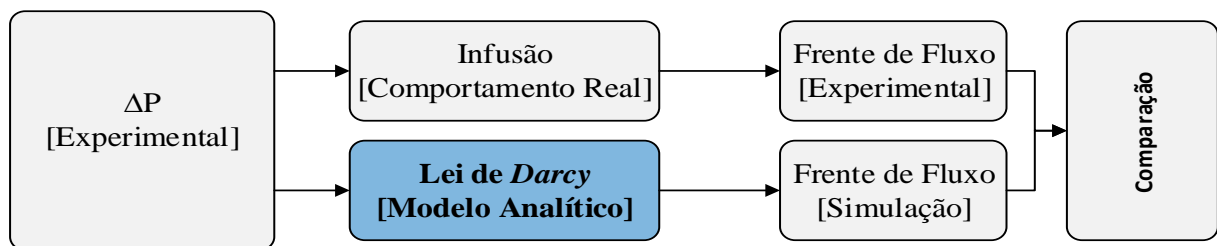


Figura 62 - Processo de verificação da lei de *Darcy*

6.3.3.2 MODELO COM CAMPO DE PRESSÕES LINEAR

O modelo com campo de pressões linear corresponde ao já determinado na secção 6.2, que resulta da substituição da equação (6.1) na equação (6.2):

$$\left[\frac{dx}{dt} = -C \cdot \frac{(P_v - P_e)}{x_{ff}} \right] \quad \text{com,} \quad C = 0.5434 \pm 0.2340 \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{kPa} \cdot \text{s}^2} \right]$$

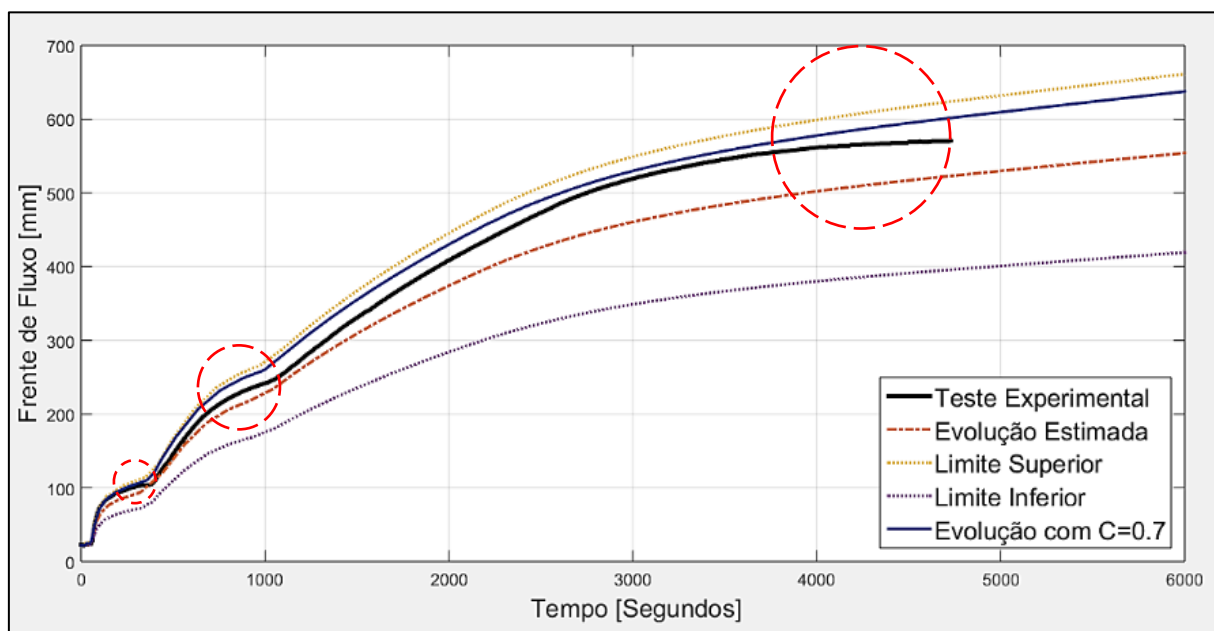


Gráfico 13 - Primeiro teste com abertura/fecho das válvulas

No Gráfico 13 estão representadas as curvas de evolução da frente de fluxo experimental (teste descrito em 6.3.2.1) e estimada ($C = 0.5434 \pm 0.2340$). A evolução experimental encontra-se entre os limites admissíveis; no entanto, quando comparada com a curva estimada a partir deste teste ($C = 0.7$, estimado quando ΔP é máximo e constante), verifica-se uma discrepância nas zonas em que ΔP supostamente tenderia para zero, o que na realidade não acontece (círculos a vermelho no Gráfico 13). Desta forma, quando a frente de fluxo real se encontra parada, na perspetiva da lei de *Darcy* a evolução continua, porque $\Delta P \neq 0$. Tendo em conta, que esta discrepância é cumulativa no decorrer dos fechos da válvula, é importante abordar este problema, para que não ocorram erros avultados na execução de simulações.

A partir deste momento serão usados dados de outro teste experimental, com um maior número de fechos da válvula, de forma a captar melhor as dinâmicas envolvidas.

6.3.3.3 MODELO COM CAMPO DE PRESSÕES LINEAR + PRESSÃO DE ENTRADA VIRTUAL

A diferença entre a evolução real da frente de fluxo e a evolução estimada na secção anterior, só ocorre porque ΔP não tende para zero quando a válvula é fechada, ou seja, a pressão de entrada (P_e) não tende para a pressão de vácuo (P_v). Posto isto, uma solução possível passa pela obtenção de um modelo que imponha o comportamento desejado à pressão de entrada.

O modelo apresenta as seguintes características:

- No instante inicial, a derivada do modelo é igual à derivada da evolução real;
- Assume-se que a evolução da pressão na entrada é de primeira ordem;
- Quando a válvula é fechada, a pressão ‘virtual’ à entrada da infusão, tende para a pressão de vácuo ($\approx -89\text{kPa}$);
- Quando a válvula é aberta, a pressão à entrada tende para $P_1 \approx -5\text{kPa}$ (com inclinação da mesa nula e com os reservatórios à altura da mesa).

A evolução da pressão ‘virtual’ apresenta a forma representada a vermelho no Gráfico 14.

Atendendo à estrutura do modelo de pressões virtuais, ilustrado na Figura 63, conclui-se que a ‘correção’ é introduzida apenas no modelo dinâmico da pressão de entrada (abordado em 6.3.4 e 6.3.4.4), não influenciando a lei de *Darcy* (mantém-se o pressuposto de que o campo de pressões é linear).

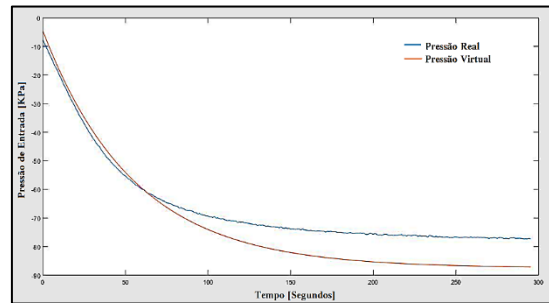


Gráfico 14 – Pressão Real vs Pressão virtual durante o fecho da válvula

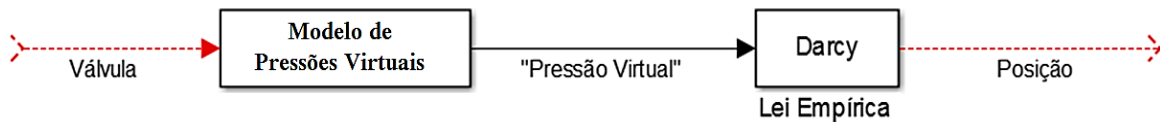


Figura 63 – Diagrama de blocos do processo com o modelo de pressões virtuais

No Gráfico 15 encontram-se as evoluções, virtual e real, do diferencial de pressões relativo ao teste realizado. Procedeu-se então à simulação do modelo e o resultado encontra-se no Gráfico 16, sendo usado o valor do parâmetro das propriedades do escoamento, $C = 0.5434 \pm 0.2340 \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{kPa} \cdot \text{s}^2} \right]$.

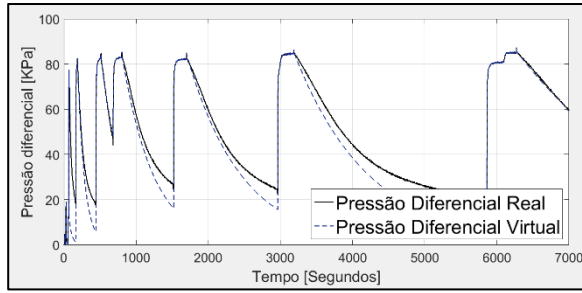
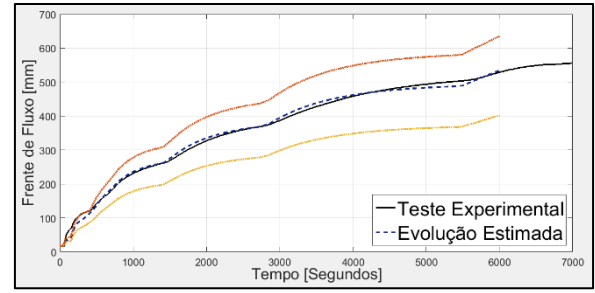


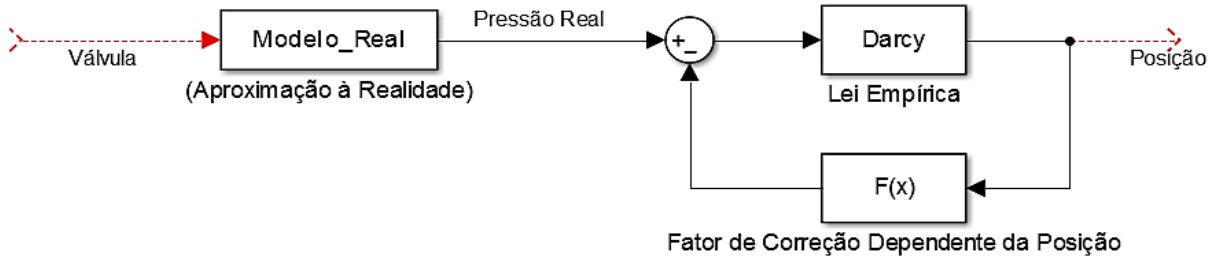
Gráfico 15 – Diferencial de pressões virtuais vs diferencial de pressões real


 Gráfico 16 – Evolução real e estimada da frente de fluxo ($C \approx 0.55$)

Como se pode verificar, no Gráfico 16, a forma das curvas tendem a seguir um comportamento idêntico, ao contrário do que acontecia no Gráfico 13. Evidencia-se então uma melhor aproximação à dinâmica do processo, mantendo-se o pressuposto de que o campo de pressões é linear e com o parâmetro das propriedades do escoamento C estimado para uma infusão contínua (com ΔP máximo).

6.3.3.4 MODELO COM CAMPO DE PRESSÕES LINEAR + PRESSÃO CAPILAR

Após o estudo do modelo de pressões virtuais, concluiu-se que seria interessante a obtenção de um modelo que não dependesse de variáveis fictícias. Na Figura 64 encontra-se a proposta inicial para a sua conceção, que consiste, na aplicação de uma função de correção, dependente de x , à equação de *Darcy*. Esta abordagem revelou-se acertada porque, no decorrer do seu estudo, foi identificado o efeito de capilaridade (quantificada pela pressão capilar), assim como toda a informação que lhe está subjacente (Capítulo 3.1.7).


 Figura 64 – Digrama de blocos do processo com o fator de correção de correção na lei de *Darcy*

A pressão capilar resulta da força de adesão da resina com o meio fibroso e atua de forma oposta ou favorável ao sentido de escoamento do fluido. Depende essencialmente de duas propriedades, a velocidade da frente de fluxo e a tensão superficial do fluido, sendo a última considerada constante. Posto isto, a função de correção a determinar ($F(x)$) corresponde à pressão capilar, descrita pelas equações (3.30) e (3.31) mencionadas em 3.1.7 - *Outros Fenómenos Agregados*:

$$\begin{cases} P_{cap}(t) = \frac{F}{D_f} \cdot \frac{1-\phi}{\phi} \cdot \gamma \cos[\theta_{CD}(t)] \\ \theta_{CD}(t) = \arccos \left[\cos \theta_{CS} - (\cos \theta_{CS} + 1) \tanh \left(4.96 \left(\frac{\mu(t)}{\gamma} \cdot \frac{dx}{dt} \right)^{0.702} \right) \right] \end{cases}$$

A maioria dos coeficientes utilizados não é conhecida, portanto, propõe-se a utilização de um fator constante com valor igual à máxima pressão capilar (quando $\frac{dx}{dt} \approx 0$), ou seja, o valor de ΔP determinado experimentalmente em 6.3.2.2, $P_{cap} \approx 8 \text{ kPa}$.

O erro máximo cometido ao considerar o fator constante, ocorre quando ΔP é máximo (válvula aberta):

$$Erro (\%) = \frac{P_{cap}}{\Delta P} \cdot 100 = \frac{8}{84} \cdot 100 \approx 9.5\%$$

Relembrando o estudo realizado em 3.1.7, não considerar a pressão capilar pode provocar erros até 100% (quando ΔP é mínimo), desta forma, se compararmos os erros cometidos e o nível de complexidade exigida, determina-se que a melhor opção é considerar a função de correção constante e igual a 8kPa (o sinal será negativo para anular ΔP no momento em que este é mínimo). Adicionando a pressão capilar ao gradiente de pressão resulta:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{1}{x_{ff}} [P_v - (P_e - P_{cap})] \quad (6.21)$$

No Gráfico 17 estão representadas as curvas de evolução real e estimadas, com $C = 0.5434 \pm 0.2340$ e $C = 0.95$ estimado relativamente a este teste. Embora os dados experimentais se mantenham dentro dos limites admissíveis, se for calculada a melhor estimativa de C , verifica-se que o valor do mesmo ($C = 0.95$) não corresponde ao estimado no modelo das pressões virtuais ($C = 0.55$). Isto significa, que o parâmetro das propriedades do escoamento ($C = 0.5434 \pm 0.2340$) obtido a partir de uma infusão com pressão de entrada constante, **não pode ser utilizado no modelo com pressão capilar**.

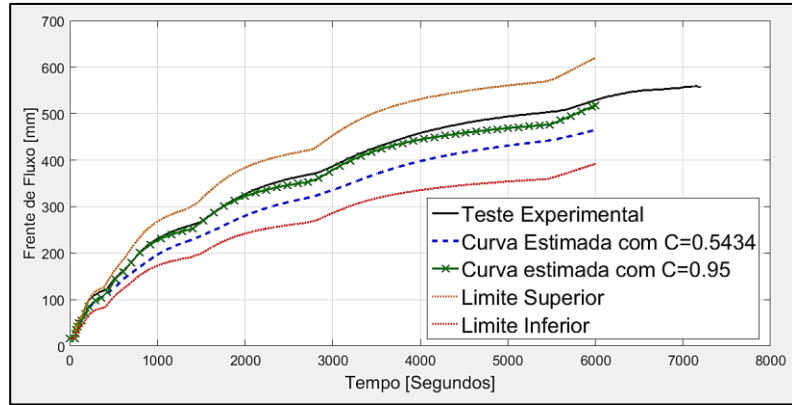


Gráfico 17 – Evolução real da frente de fluxo e respectivas simulações

Como se verá no tópico 6.3.3.5 este ‘novo’ valor de C , poderá corresponder ao valor real das propriedades do escoamento, $\frac{K}{\mu \cdot \phi}$.

6.3.3.5 MODELO COM CAMPO DE PRESSÕES NÃO LINEAR + PRESSÃO CAPILAR

Pretende-se agora, obter um modelo que inclua também a não linearidade do campo de pressões ao longo da resina (não considerada até então).

Relembrando a equação (6.11),

$$\frac{dx_{ff}}{dt} = -\frac{1}{\mu} \left[\frac{K}{\phi} \right]_{\alpha=1} \cdot (P_v - P_e + a) \cdot \frac{1}{x_{ff}} \quad (6.22)$$

Incluindo o parâmetro das propriedades do escoamento C ,

$$\frac{dx_{ff}}{dt} = [C]_{\alpha=1} \cdot (P_e - P_v - a) \cdot \frac{1}{x_{ff}} \quad (6.23)$$

Se na equação (6.23) for adicionado o efeito de capilaridade, abordado no tópico anterior, 6.3.3.4 - *Modelo com Campo de Pressões Linear + Pressão Capilar*, então:

$$\frac{dx_{ff}}{dt} = [C]_{\alpha=1} \cdot (P_e - P_v - a - P_{cap}) \cdot \frac{1}{x_{ff}} \quad (6.24)$$

Embora seja possível estimar os parâmetros C e ' a ' considerando $P_{cap} = 8 \text{ kPa}$, para evitar o erro proveniente desta simplificação, é criada uma nova variável, a_c - coeficiente de não linearidade e capilaridade, que corresponde ao efeito combinado do coeficiente de não linearidade ' a ' e da pressão capilar P_{cap} . Sabendo então que $a_c = -(a + P_{cap})$ e substituindo na equação (6.24), obtém-se:

$$\frac{dx_{ff}}{dt} = \frac{C_r}{x_{ff}} \cdot (P_e - P_v + a_c) \quad (6.25)$$

NOTA:

1. O parâmetro das propriedades do escoamento C é sempre referente à frente de fluxo ($\alpha = 1$). Sendo esta uma informação subentendida, o prefixo correspondente ($\alpha = 1$) pode ser retirado.
2. Sabe-se de antemão que o parâmetro C calculado com a inclusão dos fenómenos não lineares, corresponde ao valor real das propriedades do escoamento, $\frac{K}{\mu \cdot \phi}$, sendo, portanto, diferente do calculado apenas com os dados das infusões com pressão de entrada constante. Para facilitar a sua distinção, o parâmetro C , correspondente ao valor real das propriedades do escoamento (presente secção), é representado por C_r .

❶ Coeficiente de não linearidade e capilaridade (a_c)

Em 3.1.6 foi mencionado que o coeficiente ' a ' varia relativamente a três fatores: a pressão de entrada, a pressão de vácuo e a fração de fibra inicial, sendo os dois últimos considerados constantes neste projeto. A pressão capilar depende da velocidade que, por sua vez, depende da pressão de entrada. Deste modo, o coeficiente de não linearidade e capilaridade (a_c) também é função da pressão de entrada. O processo iterativo, que permite a obtenção da evolução de a_c em função da pressão de entrada, encontra-se representado na Figura 65.

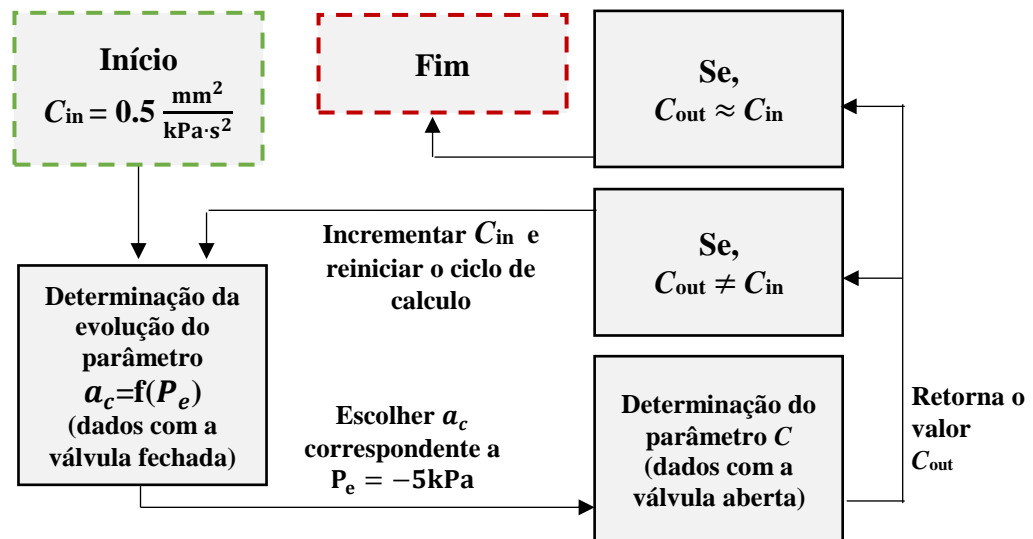


Figura 65 – Processo de obtenção do parâmetro C_r e do coeficiente a_c

Durante o processo iterativo, o parâmetro C_r é calculado com a equação (6.10), incluindo os efeitos de não linearidade e capilaridade, enquanto, que a evolução do coeficiente a_c é calculada pela seguinte equação:

$$a_{ci} = \frac{x_i^2 - x_{i_0}^2}{(t_i - t_{i_0}) \cdot 2 \cdot C_r} - (P_{ei} - P_{vi}) \quad (6.26)$$

onde,

i – índice dos elementos dos vetores de dados (posição, tempo e pressão)
 i_0 – índice no momento em que a válvula é fechada

Depois de obtidas as curvas de evolução do coeficiente a_c , discretizadas em função da pressão de entrada P_e , pretende-se obter uma solução analítica para a sua representação. Na literatura não existe nenhuma informação quanto ao tipo de função que relaciona estas variáveis; no entanto, analisou-se o comportamento das curvas e determinou-se que uma aproximação exponencial seria uma boa opção, Gráfico 19.

No Gráfico 18 estão representadas, a tracejado, as curvas de evolução do parâmetro a_c estimadas a partir de cada infusão; no entanto, para evitar mais um estudo de variação, determinaram-se as melhores estimativas dos parâmetros da função exponencial, através do método dos mínimos quadrados, com o conjunto dos dados de todas as infusões (curva representada a traço contínuo no Gráfico 18).

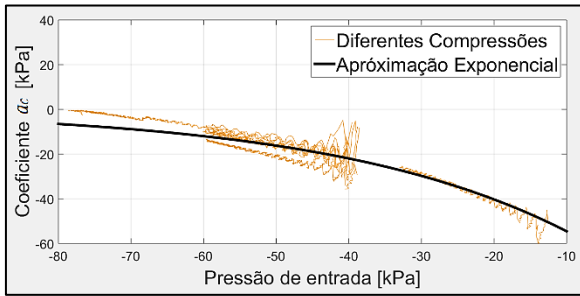


Gráfico 19 - Aproximação exponencial do coeficiente a_c da infusão 5

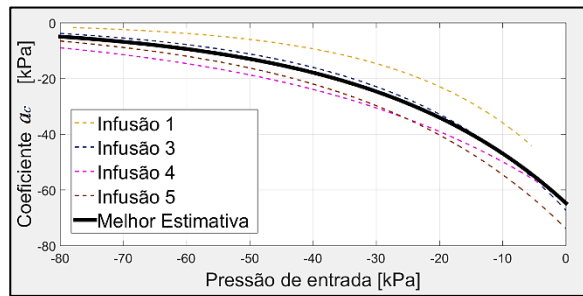


Gráfico 18 - Conjunto das aproximações exponenciais do parâmetro a_c dos 4 ensaios

Resultado da estimação (mínimos quadrados) dos parâmetros da função exponencial, que melhor aproxima os valores do coeficiente de não linearidade e capilaridade a_c , em função da pressão de entrada P_e .

$$\text{Função: } a_c = b \cdot e^{P_e \cdot c} \quad (6.27)$$

Coeficientes (limites de confiança 95%):

$$b = -64.75 \quad (-66.6, -62.91)$$

$$c = 0.03218 \quad (0.03081, 0.03354)$$

NOTA:

1. Utilizou-se uma função exponencial devido à semelhança comportamental que, apresenta relativamente à evolução do parâmetro a estimar. Outra possibilidade seria usar uma função equivalente à dos fenómenos físicos que dão origem à não linearidade do campo de pressões (função potência); no entanto, esta opção não foi executada;

2. Os gráficos de evolução do parâmetro a_c em função de P_e (exemplo: Gráfico 19) apresentam um ligeiro desfasamento entre diferentes momentos do fecho da válvula. Tal deve-se à histerese de compactação do meio fibroso (3.1.7 - *Outros Fenómenos Agregados*) que, no presente projeto, foi desprezada.

❷ Parâmetro das propriedades reais do escoamento, C_r

Os valores do parâmetro C obtidos na modelação de uma infusão com pressão de entrada constante, considerando que o perfil de pressões era linear, podem ser utilizados no cálculo do valor real das propriedades do escoamento, C_r , sendo necessária apenas a inclusão do coeficiente de não linearidade e capilaridade, a_c .

Relembrando como o parâmetro das propriedades do escoamento C é calculado:

Campo de Pressões Linear
Equação (6.9)

$$C = \frac{w^2}{2 \cdot (P_e - P_v)}$$

Campo de Pressões Não Linear
Equação (6.13) adaptada

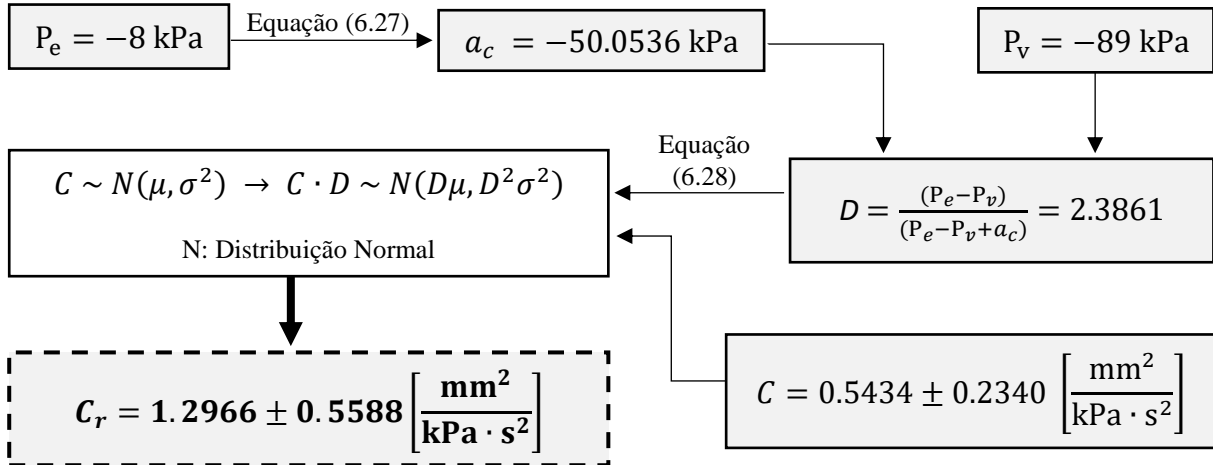
$$C_r = \frac{w^2}{2 \cdot (P_e - P_v + a_c)}$$

Para o mesmo conjunto de dados, o parâmetro w apresenta o mesmo valor, independentemente do campo de pressões considerado. Combinando a equação (6.9) e a equação (6.13) obtém-se:

$$C_r = C \cdot \frac{(P_e - P_v)}{(P_e - P_v + a_c)} \quad (6.28)$$

A equação (6.28) relaciona os valores do parâmetro das propriedades do escoamento (C) obtidos através de uma infusão contínua (considerando o campo de pressões linear), com os valores do parâmetro das propriedades reais do escoamento (C_r) obtidos com o pressuposto de que o campo de pressões é não linear.

De seguida é apresentado o procedimento de cálculo do parâmetro das propriedades reais do escoamento (C_r), considerando que o mesmo segue uma distribuição normal, gaussiana e simétrica (probabilidade de aproximadamente 95%):



❸ Simulação

Mais uma vez são usados os dados experimentais utilizados nos modelos das secções anteriores. O parâmetro das propriedades do escoamento passa a incluir o efeito da não linearidade, $C_r = 1.2966 \pm 0.5588 \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{kPa} \cdot \text{s}^2} \right]$, sendo o valor estimado a partir deste teste, $C_r \approx 0.95 \left[\frac{\text{mm}^2}{\text{kPa} \cdot \text{s}^2} \right]$.

Realizando as respectivas simulações obtêm-se as curvas de evolução da frente de fluxo representadas no Gráfico 20. Verifica-se uma aproximação às dinâmicas mais refinada; no entanto, a variabilidade do parâmetro das propriedades do escoamento está sempre presente.

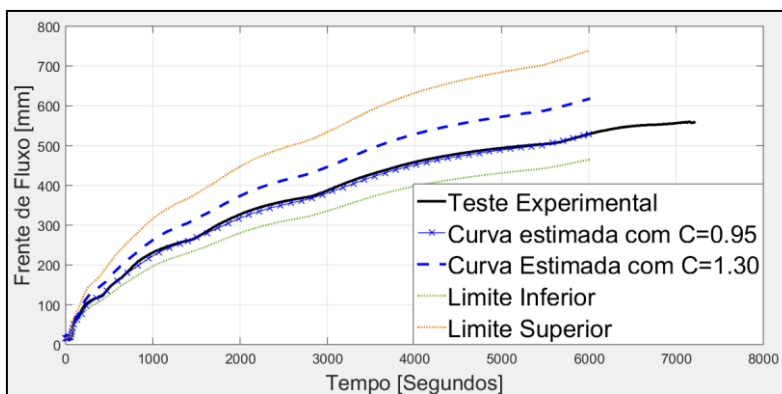


Gráfico 20 – Evolução real vs simulação do modelo com campo de pressões não linear e pressão capilar

Relembre-se que o parâmetro das propriedades do escoamento estimado na secção anterior, 6.3.3.4 - *Modelo com Campo de Pressões Linear + Pressão Capilar*, é aproximadamente igual ao aqui calculado. Deste modo, é possível que o valor das propriedades reais do escoamento (C_r), também, possa ser usado no modelo com pressão capilar.

6.3.3.6 COMPARAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Na Tabela 10 encontra-se uma avaliação qualitativa dos modelos propostos, de forma, a facilitar a sua comparação.

Tabela 10 – Comparação dos modelos propostos para implementação da lei de Darcy

Modelo	Complexidade	Dificuldade de obtenção	Aproximação das Dinâmicas	Parâmetros	Exatidão
Campo de Pressões Linear	Muito Baixa	Muito Baixa	Razoável	$C = 0.5434 \pm 0.2340$	Depende da variação de C
Campo de Pressões Linear + Pressão Virtual	Razoável	Elevada	Boa	$C = 0.5434 \pm 0.2340$	Depende da variação de C
Campo de Pressões Linear + Pressão Capilar	Baixa	Baixa	Boa	$C_r = 1.2966 \pm 0.5588$ $P_c = 8 \text{ kPa}$	Depende da variação de C_r
Campo de Pressões Não Linear + Pressão Capilar	Elevada	Razoável	Muito Boa	$C_r = 1.2966 \pm 0.5588$ $a_c = 64.75 \cdot e^{P_e \cdot 0.03218}$	Depende da variação de C_r e a_c

As diferenças de comportamento dinâmico, relativamente aos modelos analisados, são visualmente identificáveis no Gráfico 21. Note-se que no modelo com o campo de pressões linear, a evolução estimada, no momento em que a válvula é fechada, tende a afastar-se da evolução real da frente de fluxo, ao contrário, do que acontece nas curvas obtidas por simulação dos restantes modelos dinâmicos.

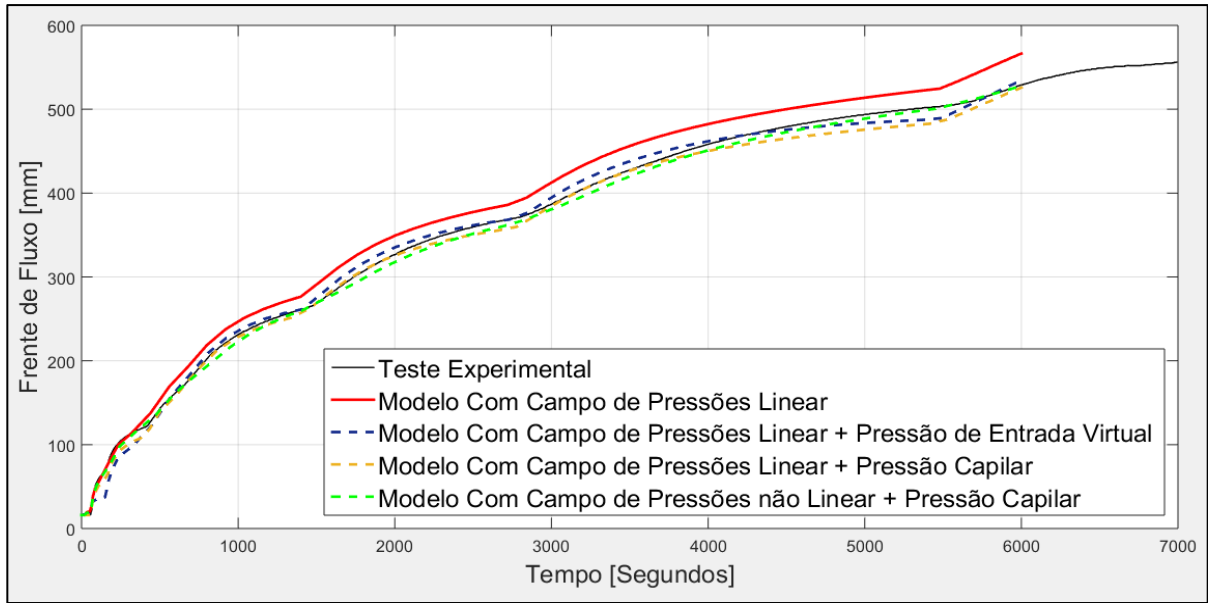


Gráfico 21 – Comparação dos modelos propostos para correção da lei de Darcy

Para uma avaliação quantitativa dos modelos é necessária a obtenção do erro quadrático médio (EQM), relativamente à evolução real da frente de fluxo. O seu cálculo é realizado a partir da seguinte equação:

$$EQM = \sum_{i=1}^N \frac{(x_{ff} - \widehat{x_{ff}})^2}{N} \quad (6.29)$$

Sendo,

$\widehat{x_{ff}}$ - frente de fluxo estimada

x_{ff} - frente de fluxo real

N - número de elementos do vetor de dados

Os resultados obtidos encontram-se enumerados na Tabela 11 e, como se esperava, a aproximação às dinâmicas do processo, melhora à medida que o modelo dinâmico evolui.

Tabela 11 – Erro quadrático médio (EQM)

Modelo Dinâmico	Campo de Pressões Linear	Campo de Pressões Linear + Pressão de Entrada Virtual	Campo de Pressões Linear + Pressão Capilar	Campo de Pressões Não Linear + Pressão Capilar
EQM [mm ²]	402.21	111.58	85.48	28.86

Todos os modelos apresentam vantagens e desvantagens. No entanto, tem que existir uma procura de qualidade na simulação de uma infusão a vácuo. **Portanto, será implementado no modelo global do processo, o que melhor representa os fenómenos físicos envolvidos, ou seja, o modelo com campo de pressões não linear e pressão capilar.**

Se, em vez da simulação, o objetivo for a obtenção de controladores para o sistema, então aconselha-se a utilização do modelo com campo de pressões linear e pressão capilar, pois apresenta um bom nível de aproximação, a complexidade é reduzida e é de fácil obtenção.

NOTA: O presente estudo teve em foco a implementação de variáveis com significado físico. Se o leitor pretende um modelo ainda mais simplificado, sendo consentida a inclusão de variáveis fictícias, então aconselha-se a utilização da lei de Darcy, considerando que o parâmetro das propriedades do escoamento (C) é variável.

6.3.4 MODELAÇÃO DA PRESSÃO DE ENTRADA [ATUAÇÃO DA VÁLVULA]

6.3.4.1 DESCRIÇÃO

Pretende-se obter um modelo dinâmico, que descreva o comportamento da pressão, à entrada da infusão, a partir do momento em que a válvula é atuada:



Para facilitar o seu estudo, o modelo da pressão de entrada será dividido em dois submodelos, correspondentes ao fecho e abertura da válvula. No primeiro caso serão propostos dois modelos dinâmicos, um dependente do tempo e outro dependente da posição da frente de fluxo (independente do tempo). No segundo caso, devido à sua simplicidade, apenas será proposto um modelo dependente do tempo.

6.3.4.2 MODELAÇÃO COM A VÁLVULA FECHADA [DEPENDENTE DO TEMPO]

❶ Desenvolvimento Analítico

Partindo da equação diferencial (6.20):

$$\frac{dP_e}{dt} = \frac{S}{R_V} \cdot (P_1 - P_e) - \frac{S}{R(x)} \cdot (P_e - P_v)$$

Considerando que a válvula está fechada, $R_V = \infty$, logo:

$$\frac{S}{R_V} \cdot (P_1 - P_e) = 0 \quad (6.30)$$

Ou seja,

$$\boxed{\frac{dP_e}{dt} = -\frac{S}{R(x)} \cdot (P_e - P_v)} \quad (6.31)$$

O termo, do lado direito da equação, corresponde ao caudal que sai do reservatório, Figura 59. Se se fizer uma analogia com a lei de *Darcy* (com campo de pressões linear):

$$Q = A \times v = A \cdot \frac{K}{\mu\phi} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{A \cdot C \cdot (P_e - P_v)}{x} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Q = \frac{1}{R(x)} \cdot (P_e - P_v)$$

Logo,

$$\frac{1}{R(x)} = \frac{A \cdot C}{x} \quad (6.32)$$

Substituindo (6.32) em (6.31):

$$\frac{dP_e}{dt} = -S \cdot \frac{A \cdot C}{x} \cdot (P_e - P_v) \quad (6.33)$$

sendo S a constante de proporcionalidade, C o parâmetro das propriedades do escoamento e A a área transversal do laminado. Combinando as três constantes, obtém-se o coeficiente de proporcionalidade global (G):

$$G = S \cdot A \cdot C \quad (6.34)$$

Substituindo (6.34) em (6.33):

$$\frac{dP_e}{dt} = -\frac{G}{x} \cdot (P_e - P_v) \quad (6.35)$$

Para a realização da estimação dos parâmetros, integra-se a equação (6.35):

$$P_e(t) = C_1 \cdot e^{-\frac{G}{x}t} + P_v$$

Se $P_e(0) = P_0$, então $C_1 = P_0 - P_v$

$$P_e(t) = (P_0 - P_v) \cdot e^{-\frac{G}{x}t} + P_v \quad (6.36)$$

sendo P_0 a pressão de entrada no momento em que a válvula é fechada. De acordo com a equação (6.36), a pressão de entrada tende para a pressão de vácuo, algo que já sabemos não corresponder à realidade. Portanto é necessário incluir a pressão capilar (P_c):

$$P_e(t) = (P_0 - (P_v + P_c)) \cdot e^{-\frac{G}{x}t} + (P_v + P_c) \quad (6.37)$$

Sabendo que, $P_v = -89 \text{ kPa}$ e $P_c = 8 \text{ kPa}$, então:

$$P_e(t) = (P_0 + 81) \cdot e^{-\frac{G}{x}t} - 81 \quad (6.38)$$

O modelo apresenta-se como sendo de 1ª ordem, com constante de tempo variável, e o parâmetro G é então estimado com a equação (6.38), através da inclusão dos dados de pressão, tempo e posição da frente de fluxo.

❷ Estimação do Coeficiente de Proporcionalidade Global (G)

Para a estimação do coeficiente de proporcionalidade global (G) são utilizados dados de cinco testes experimentais, com cerca de seis fechos da válvula em cada, perfazendo um total de 33 fechos da válvula.

Após a obtenção das 33 amostras do coeficiente G , Gráfico 22, verificou-se que não segue uma evolução constante. Esta é uma evidência de que a aproximação linear proposta no início da modelação, $P_e = S \cdot V_R$, pode não corresponde à realidade. No entanto, sabe-se da literatura que a fração de fibra varia com a pressão de compressão segundo uma função de potência: $V_f = V_{f0} \cdot P_{comp}^B$. Se fizermos uma analogia entre as equações, torna-se obvio que P_e e V_R estão relacionados também segundo uma função de potência. Posto isto, o coeficiente de proporcionalidade global, G , relaciona-se com a posição da frente de fluxo da seguinte forma:

$$G = a_1 \cdot x_{ff}^{a_2} [\text{mm/s}^2] \quad (6.39)$$

Estimando os coeficientes da equação (6.39), obtiveram-se os seguintes dados:

Coeficientes (com limites de confiança de 95%):

$$a_1 = 9.20 (6.29, 12.11)$$

$$a_2 = -0.505 (-0.574, -0.436)$$

$$a_1 = 8.98 \pm 3.05$$

$$a_2 = -0.5$$

Considerando que:

- a_2 – é aproximado ao valor do coeficiente de uma raiz negativa;
- a_1 - segue uma distribuição normal, gaussiana e simétrica, com uma probabilidade de 95%.

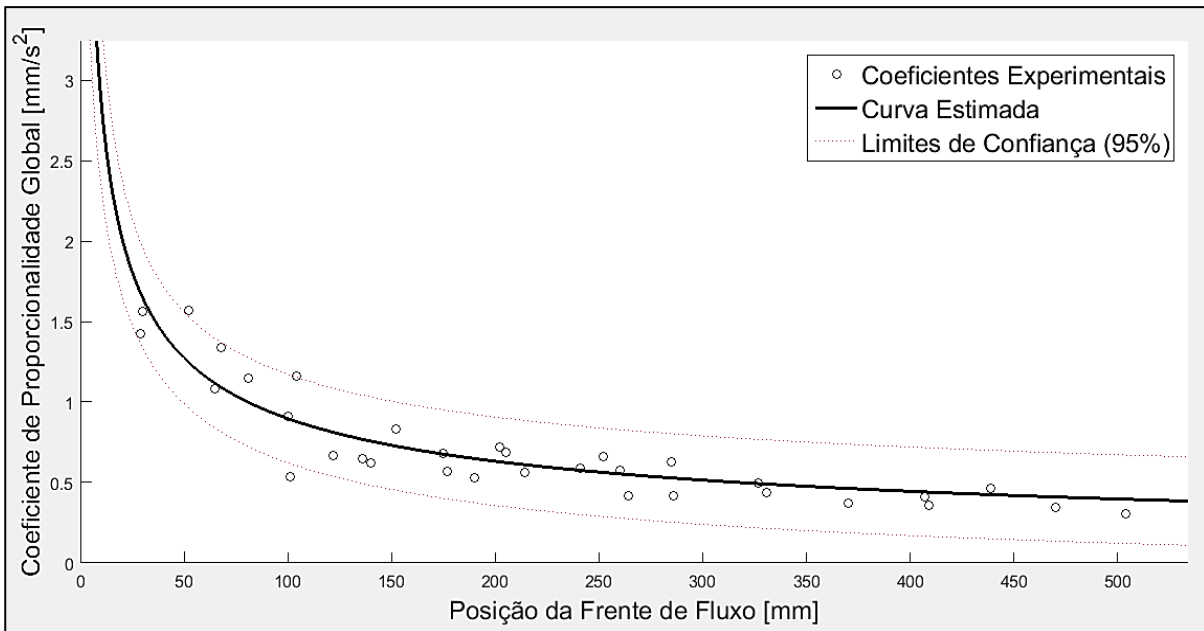


Gráfico 22 – Estimação do coeficiente de proporcionalidade global em função da posição da frente de fluxo

3 Simulação e Conclusão

Realizou-se uma simulação do modelo dinâmico da pressão da entrada, descrito pela equação (6.38), nos momentos em que a válvula é fechada. Os resultados obtidos são os mostrados no Gráfico 23, verificando-se, na sua globalidade, uma boa aproximação ao comportamento real da pressão. Ainda assim, apresenta uma discrepância que aumenta à medida que a pressão de entrada se aproxima da pressão de vácuo e a frente de fluxo se aproxima do final da infusão. Apesar disso, se for adicionado o efeito de variação do parâmetro a_1 , verifica-se que a curva experimental, do 3º fecho da válvula, se encontra dentro dos limites admissíveis.

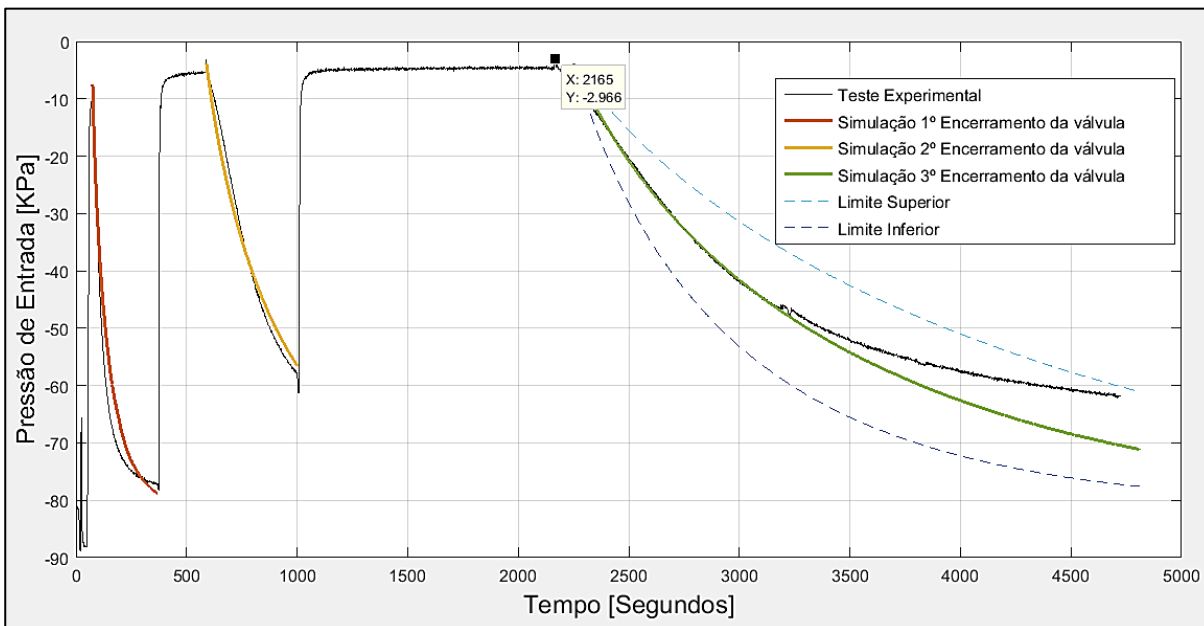


Gráfico 23 – Simulação da pressão de entrada quando a válvula é fechada

6.3.4.3 MODELAÇÃO COM A VÁLVULA FECHADA [INDEPENDENTE DO TEMPO]

Neste momento, torna-se interessante a obtenção de um modelo dinâmico que, ao contrário do anterior, seja apenas dependente de variáveis como, a posição da frente de fluxo e a pressão de entrada. Desta forma, teremos um modelo que relaciona diretamente a pressão com a posição da frente de fluxo, independentemente do tempo.

A ideia base é a seguinte:

A partir do momento em que a válvula é fechada, não existe mais entrada de resina no meio fibroso. O volume de resina é então constante, existindo, portanto, um modelo que relaciona a pressão de entrada com a posição da frente de fluxo.

A modelação começou admitindo-se que a espessura do laminado varia linearmente ao longo da posição x , para se obter a função que descreve a altura h , Figura 66. Depois aplicou-se a lei de elasticidade, $\sigma = E \cdot \varepsilon$, na entrada, de forma a obter a relação da pressão de entrada, com a posição da frente de fluxo. Claro que os resultados não foram muito bons; no entanto, serviu de base às etapas que se sucederam.

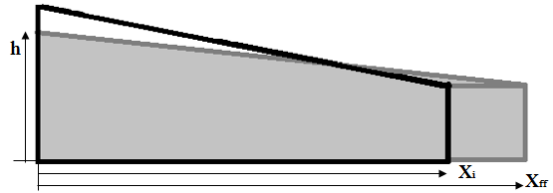


Figura 66 – Variação da espessura ao longo da resina

Foram várias as etapas para melhoramento do modelo inicial, sendo o resultado final descrito a seguir.

Considerando o campo de pressões (de compressão) linear, ao longo da resina:

$$P_{comp} = \left(1 - \frac{x}{x_{ff}}\right) \cdot P_e + P_v \cdot \frac{x}{x_{ff}} \quad (6.40)$$

Relembrando a equação do comportamento viscoelástico do meio fibroso:

$$V_f = V_{f0} \cdot P_{comp}^B \quad (6.41)$$

Combinando as equações (6.40) e (6.41) e sabendo que a razão de fibra corresponde à altura da fibra sobre a altura total do laminado, $V_f = h_f/h$, então:

$$h = \frac{h_f}{V_{f0}} \left(\left(1 - \frac{x}{x_{ff}}\right) \cdot P_e + P_v \cdot \frac{x}{x_{ff}} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (6.42)$$

Visto que o volume se mantém igual ao volume inicial ($V_i = V$),

$$\int_0^{x_i} h_i dx = \int_0^{x_{ff}} h dx$$

Realizando todos os cálculos subjacentes obtém-se:

$$\frac{P_v^{\frac{1}{B}+1} - P_{ei}^{\frac{1}{B}+1}}{\frac{P_v - P_{ei}}{x_i}} = \frac{P_v^{\frac{1}{B}+1} - P_e^{\frac{1}{B}+1}}{\frac{P_v - P_e}{x_{ff}}} \quad (6.43)$$

sendo P_{ei} e x_i a pressão à entrada e a posição da frente de fluxo no momento em que a válvula é fechada e B o coeficiente do comportamento viscoelástico do meio fibroso.

Realizando a estimação (a partir de 10 amostras) do coeficiente do comportamento viscoelástico (B) do meio fibroso obteve-se:

$$\text{Média } (\mu) = 2.5323$$

$$\text{Desvio Padrão } (\sigma) = 0.7148$$

No Gráfico 24 estão representadas as curvas de evolução (real e estimada) da posição da frente de fluxo em função da pressão de entrada, durante um dos fechos da válvula. Tal como no modelo do tópico anterior, também este tende a afastar-se da curva real, quando a pressão de entrada se encontra mais próxima da pressão de vácuo.

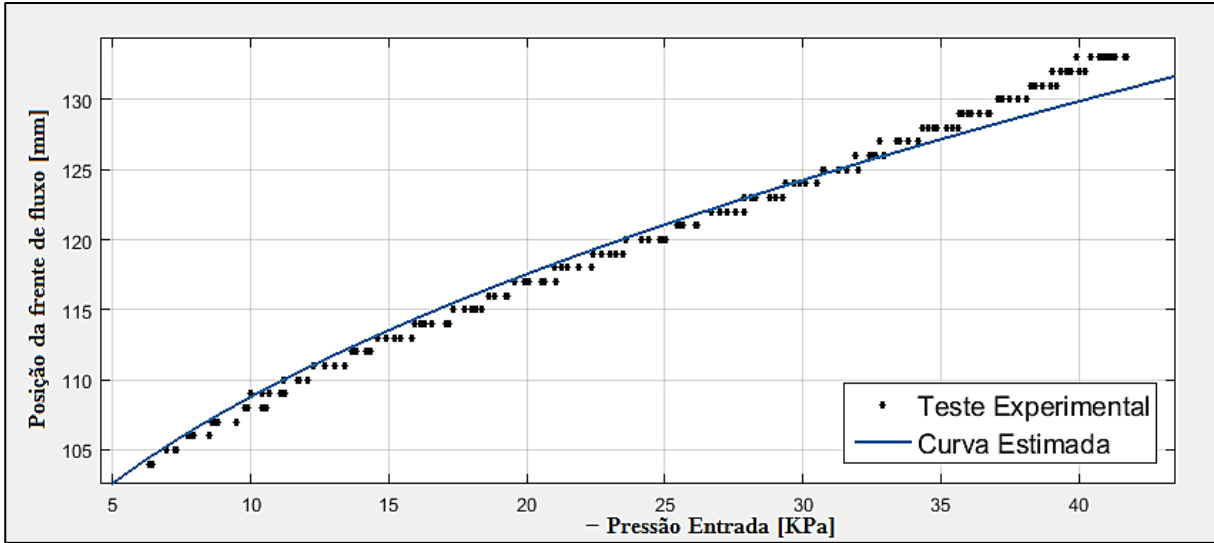


Gráfico 24 – Simulação do modelo de pressões independente do tempo

Embora se tenha verificado, que o modelo dinâmico da pressão de entrada sem influência do tempo apresenta resultados positivos, no prosseguir dos trabalhos será usado o modelo do tópico anterior (em função do tempo).

Se em trabalhos futuros for utilizado este modelo, aconselha-se a realização de um estudo de variação mais preciso relativamente ao coeficiente do comportamento viscoelástico do meio fibroso (B).

6.3.4.4 MODELAÇÃO COM A VÁLVULA ABERTA

Parte-se mais uma vez da equação (6.10):

$$\frac{dP_e}{dt} = \left[\frac{S}{R_V} \cdot (P_1 - P_e) \right] - \frac{S}{R(x)} (P_e - P_v) \approx 0$$

Neste caso é necessário estimar $\frac{S}{R_V}$, que corresponde ao inverso da constante de tempo da dinâmica dominante quando a válvula é aberta. Para a sua obtenção utilizaram-se os dados correspondentes a aberturas realizadas muito próximo do final da infusão. Desta forma, pode-se desprezar o termo negativo da equação, porque a resistência do meio fibroso é muito elevada.

Devido à característica dominante da dinâmica da pressão de entrada, quando a válvula é aberta, considera-se que a constante de tempo é constante: $\frac{1}{\frac{S}{R_V}} \approx 5 \text{ s}$.

6.3.4.5 DIAGRAMA SÍNTESE DO MODELO DA PRESSÃO À ENTRADA DA INFUSÃO

Na Figura 67 encontra-se representado, de forma simplificada, o modelo que descreve o comportamento da pressão à entrada da infusão, em função do estado de atuação das válvulas. Todas as variáveis encontram-se devidamente caracterizadas à exceção da pressão à entrada da válvula (P_1), que será alvo de estudo na próxima secção.

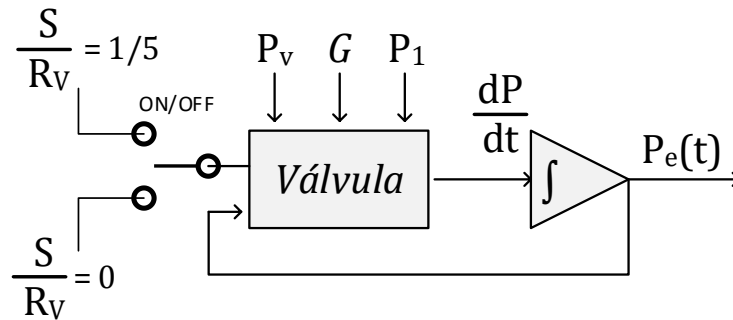


Figura 67 – Diagrama de blocos do modelo de pressão à entrada da infusão

6.3.5 MODELAÇÃO DA PRESSÃO À ENTRADA DAS VÁLVULAS [SISTEMAS AUXILIARES]

Para facilitar o controlo do gradiente de pressão ao longo do escoamento são implementados os sistemas de controlo da altura dos reservatórios e da inclinação da mesa de infusão. A atuação dos mesmos faz variar a pressão à entrada das válvulas (P_1) que, por sua vez, influencia a pressão à entrada da infusão (P_e), quando a válvula está aberta. No caso da mesa de infusão, a variação do ângulo de inclinação também influencia diretamente o gradiente de pressão por influência da ação gravítica.

6.3.5.1 MODELAÇÃO DO SISTEMA DE ELEVACÃO

Com o sistema de elevação dos reservatórios de resina pretende-se que, em função da altura dos mesmos, seja possível controlar a pressão à entrada da válvula (P_1). De notar que em momento algum o reservatório poderá estar acima da entrada da infusão, caso contrário, a pressão no interior passaria a ser superior à atmosférica e o saco levantaria.

Após realização de um teste experimental, observou-se que a pressão P_1 evolui linearmente com o deslocamento do reservatório. Além disso, também se verificou que não existem outras dinâmicas acrescidas, ou seja, a pressão P_1 evolui instantaneamente com a deslocação do reservatório, Figura 68.

Sendo assim, pode modelar-se a pressão de entrada de acordo com a seguinte expressão:

$$P_1 = T \cdot h_r + P_{1,0} \quad (6.46)$$

com,

T - taxa de evolução

$P_{1,0} = -14.5$ kPa (pressão em $h_r = 0$)

$H_e = 1.30$ m (altura da entrada da infusão, se inclinação nula)

h_r = altura do reservatório ($0 < h < H_e$)

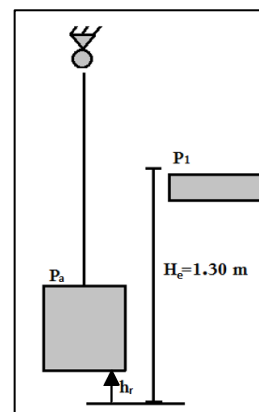


Figura 68 – Representação da altura do reservatório da resina

Calculando a taxa de evolução T a partir do Gráfico 25:

$$T = \frac{\Delta P_1}{\Delta h_r} = \frac{(-5 - (-14.5))}{(130 - 0)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow T = 0.0731 \text{ kPa/cm}$$

Diferenciando (6.46):

$$\frac{dP_1}{dt} = T \frac{dh_r}{dt} \quad (6.47)$$

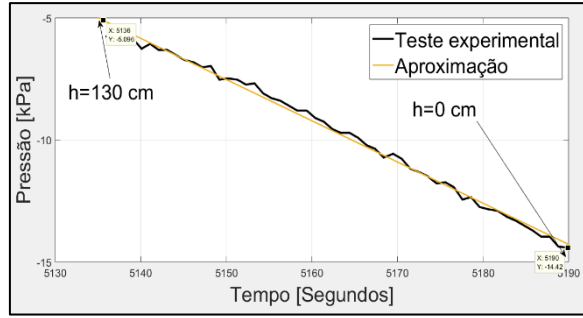


Gráfico 25 – Variação da pressão com a altura do reservatório

Se a tensão nas baterias, responsáveis pela alimentação do sistema de elevação, for máxima e constante, então a velocidade de deslocamento dos reservatórios também é constante:

$$\frac{dh_r}{dt} = \pm \frac{130}{(5190 - 5136)} = \pm 2.41 \text{ cm/s}$$

Como o sistema de elevação dos reservatórios é do tipo *on-off*, o diagrama de simulação que o representa é o da Figura 69.

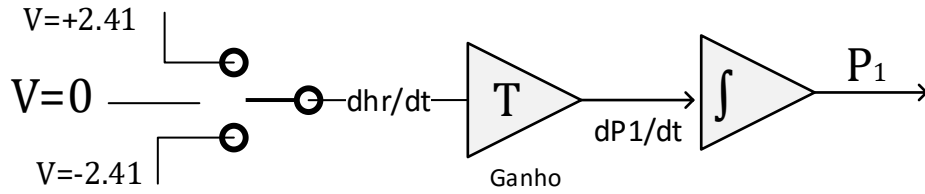


Figura 69 – Diagrama de blocos do sistema de elevação dos reservatórios

6.3.5.2 MODELAÇÃO DO SISTEMA DE INCLINAÇÃO

Para a modelação do sistema de inclinação considera-se que o reservatório se encontra à mesma altura da mesa ($H_{\text{mesa}}=130$ cm). Além disso, é necessário referir que a entrada da infusão encontra-se distanciada de 25 cm da periferia da mesa. Portanto, a distância da entrada da infusão até ao eixo da mesa é de $L_e=50$ cm.

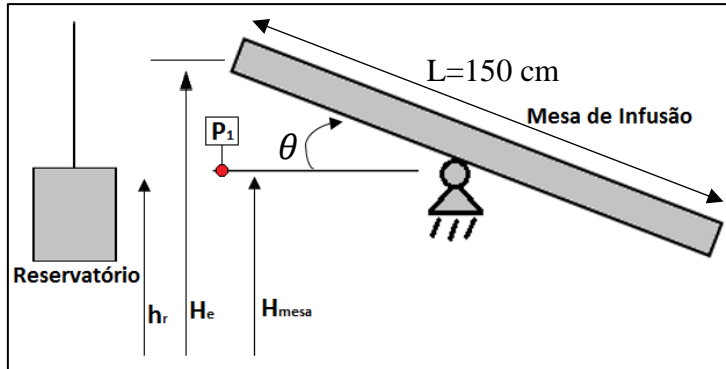


Figura 70 – Representação do sistema de inclinação da mesa de infusão

Sabendo que a pressão varia linearmente com a diferença de altura, então:

$$P_1 = I \cdot \Delta H_e \quad (6.48)$$

com,

I - taxa de variação

ΔH_e - diferença de altura na entrada

A diferença de altura na entrada relaciona-se com o ângulo de inclinação da seguinte forma:

$$\Delta H_e = H_e - H_{mesa} = L_e \cdot \sin \theta \quad (6.49)$$

Com,

H_e - altura da entrada da infusão

H_{mesa} - altura do eixo da mesa (130cm)

L_e - distância da entrada até ao eixo da mesa (50cm)

θ - ângulo de inclinação da mesa

Tendo em conta que a mesa apresenta um intervalo de inclinação pequeno (-40° a $+40^\circ$), pode-se aproximar a função *seno* aos primeiros termos da série de *Taylor* em torno do ponto $\theta = 0$:

$$\sin \theta \approx \sin 0 \cdot (\theta - 0)^0 + \frac{\cos 0 \cdot (\theta - 0)^1}{1!} + \dots \approx \theta \quad (6.50)$$

Combinando as equações (6.48), (6.49) e (6.50), obtém-se:

$$P_1 = I \cdot L_e \cdot \theta \quad (6.51)$$

Calculando a constante $I \cdot L_e$ a partir do Gráfico 26:

$$I \cdot L_e = \frac{\Delta P_1}{\Delta \theta} = \frac{(-19.5 - (-15))}{(40 - 0)} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow I \cdot L_e = -0.1125 \text{ kPa}/^\circ$$

Diferenciando (6.51):

$$\frac{dP_1}{dt} = I \cdot L_e \frac{d\theta}{dt} \quad (6.52)$$

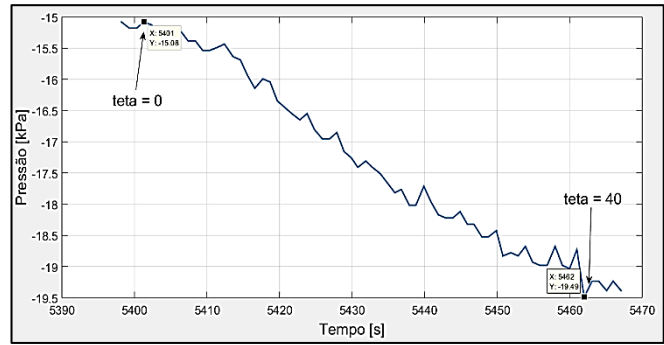


Gráfico 26 – Variação da pressão em função da inclinação da mesa de inclinação

Se a tensão nas baterias for máxima e constante, então a velocidade de rotação da mesa também é constante:

$$\frac{d\theta}{dt} = \pm \frac{40 - 0}{(5462 - 5401)} = \pm 0.656 \text{ }^\circ/\text{s}$$

Na Figura 71 encontra-se o diagrama de simulação que representa a influência da inclinação da mesa na pressão à entrada das válvulas. Neste sistema existe controlo do ângulo da mesa, pelo que apenas é necessário definir o ângulo de referência para obter a pressão pretendida.

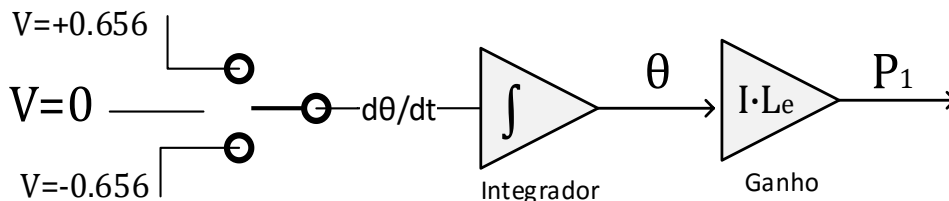


Figura 71 – Diagrama de blocos do sistema de inclinação da mesa

Para concluir, pretende-se determinar a influência que a inclinação da mesa apresenta no gradiente de pressão. O efeito tem como origem a ação gravítica e será previsto pela equação de *Bernoulli*.

Posto isto, a contribuição gravítica calcula-se da seguinte forma:

$$P_g = \rho_{resina} \cdot g \cdot \Delta h_{escoamento} \quad (6.53)$$

O desnível entre a entrada da infusão e a frente de fluxo obtém-se por:

$$\Delta h_{escoamento} = x_{ff} \cdot \sin \theta \approx x_{ff} \cdot \theta \quad (6.54)$$

Substituindo a equação (6.54) na equação (6.53),

$$P_g = \rho_{resina} \cdot g \cdot x_{ff} \cdot \theta \quad (6.55)$$

com,

ρ_{resina} – densidade volúmica da resina
 g – aceleração gravítica
 x_{ff} – posição da frente de fluxo
 θ – ângulo de inclinação da mesa (rad)

Analisando a equação (6.55) verifica-se que a contribuição gravítica será tanto maior, quanto maior for a inclinação e a posição da frente de fluxo. Repare-se que se a inclinação for positiva, o gradiente de pressão é incrementado, levando à aceleração do escoamento. Por outro lado, se o ângulo for negativo, a frente de fluxo tende a abrandar. O seu efeito é incluído no diferencial de pressões da seguinte forma:

$$\Delta P = P_e - P_v + P_g \quad (6.56)$$

NOTA: A partir dos dados experimentais utilizados na modelação do sistema de variação da altura dos reservatórios verificou-se que $\rho_{resina} \approx 1100 \text{ kg/m}^3$. Sabendo que a $x_{ff \text{ máximo}} = 60 \text{ cm}$ e que $\theta_{\text{máximo}} = 0.698 \text{ rad}$, então a contribuição gravítica máxima é:

$$P_{g \text{ max}} = 1100 \cdot 9.8 \cdot 0.6 \cdot 0.698 \approx \mathbf{4.5 \text{ kPa}}$$

Verifica-se então que, mesmo em condições limite, a sua contribuição é bastante reduzida, pelo que não serão realizadas validações experimentais. Ainda assim, as equações que descrevem o fenómeno serão incluídas no modelo global de forma a elucidar o leitor relativamente à sua existência.

6.3.6 MODELO GLOBAL DE INFUSÃO COM PRESSÃO DE ENTRADA VARIÁVEL

Após consolidação de todo o processo de modelação descrito é representado no diagrama da Figura 72, o modelo de simulação global, da posição da frente de fluxo em função do estado da atuação das válvulas e dos sistemas auxiliares.

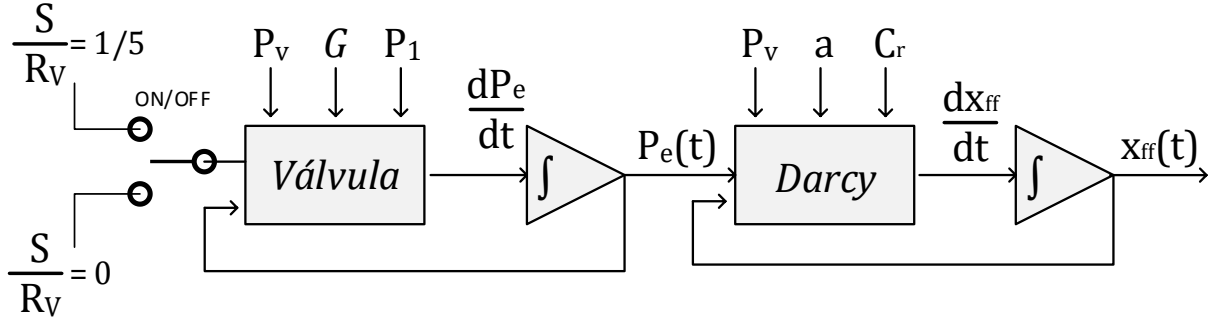


Figura 72 – Diagrama do modelo global de uma infusão não contínua

De seguida apresenta-se o conjunto de equações correspondentes ao modelo ilustrado na figura anterior.

Modelo dinâmico da pressão à entrada da infusão:

$$\frac{dP_e}{dt} = \frac{S}{R_v} \cdot (P_1 - P_e) - \frac{G}{x} \cdot (P_e - P_v) \quad (6.57)$$

- $G = a_1 * x^{a_2}$
 $a_1 = 8.98 \pm 3.05$
 $a_2 = -0.5$
- $\frac{S}{R_v} = \frac{1}{5}$ (válvula aberta)
- $\frac{S}{R_v} = 0$ (válvula fechada)

Lei de Darcy com campo de pressões não linear e pressão capilar:

$$\frac{dx_{ff}}{dt} = \frac{C_r}{x_{ff}} \cdot (P_e - P_v + a_c) \quad (6.58)$$

- $C_r = 1.2966 \pm 0.5588 \left[\frac{mm^2}{kPa \cdot s^2} \right]$
- $a_c = b_1 \cdot e^{P_e \cdot b_2}$
 $b_1 = -64.75$
 $b_2 = 0.03218$

Segue-se o modelo que descreve o comportamento da pressão à entrada das válvulas em função dos sistemas auxiliares de variação da altura dos reservatórios e da inclinação da mesa de infusão. As ações individuais podem ser combinadas através de um simples somatório, resultando no diagrama da Figura 73.

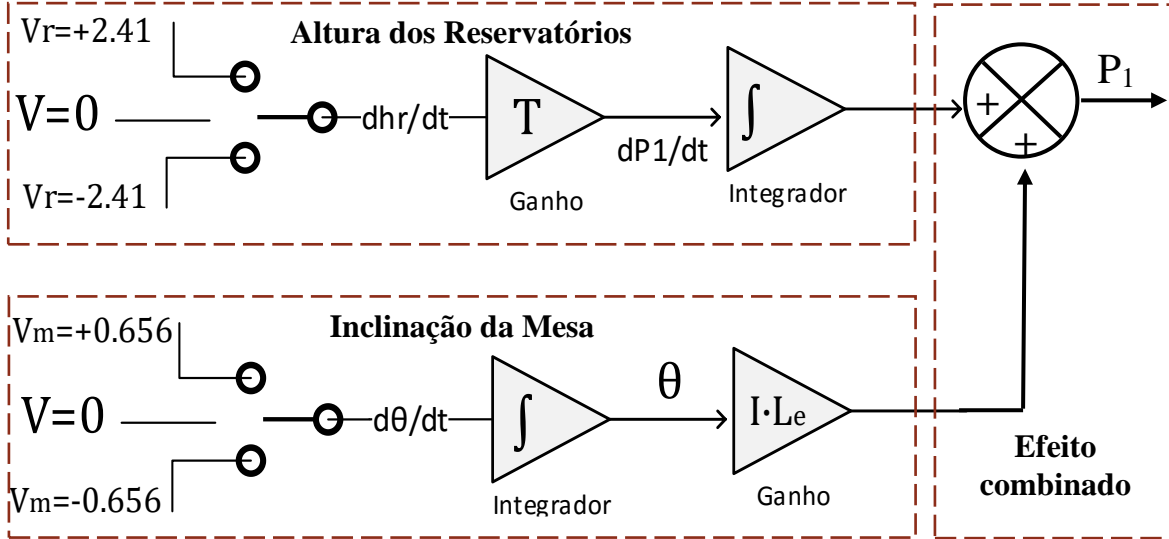


Figura 73 – Diagrama de blocos do sistema de inclinação da mesa

Modelo dinâmico da pressão à entrada das válvulas:

$$\frac{dP_1}{dt} = T \frac{dh_r}{dt} \quad (6.59)$$

$$T = 0.0731 \text{ kPa/cm}$$

$$\frac{dP_1}{dt} = I \cdot L_e \frac{d\theta}{dt} \quad (6.60)$$

$$I \cdot L_e = -0.1125 \text{ kPa/}^\circ$$

Contribuição gravítica devido à inclinação da mesa:

$$P_g = \rho_{resina} \cdot g \cdot x_{ff} \cdot \theta \quad (6.61)$$

$$\Delta P = P_e - P_v + P_g$$

6.3.8 VALIDAÇÃO E ANÁLISE

Para a validação do modelo dinâmico da pressão à entrada da infusão, com variação do estado de atuação das válvulas, foi realizado mais um teste experimental. Obtiveram-se os dados de posição e velocidade da frente de fluxo apresentados no Gráfico 27 e no Gráfico 28, respetivamente.

As simulações numéricas foram realizadas a partir do acoplamento dos modelos da pressão à entrada da infusão e do escoamento no meio fibroso. São implementadas as melhores estimativas de todos os parâmetros, à exceção do parâmetro das propriedades reais do escoamento, C_r , em que se consideram também os limites de variação e o valor estimado a partir desta experiência ($C_r=1.15$). Atendendo aos resultados obtidos, é possível afirmar que o modelo é válido para a representação de infusões a vácuo, com variação da pressão na sua entrada. Ainda assim, o nível de aproximação do modelo é limitado pelo caráter estocástico dos parâmetros, que podem apresentar flutuações consideráveis relativamente aos valores nominais.

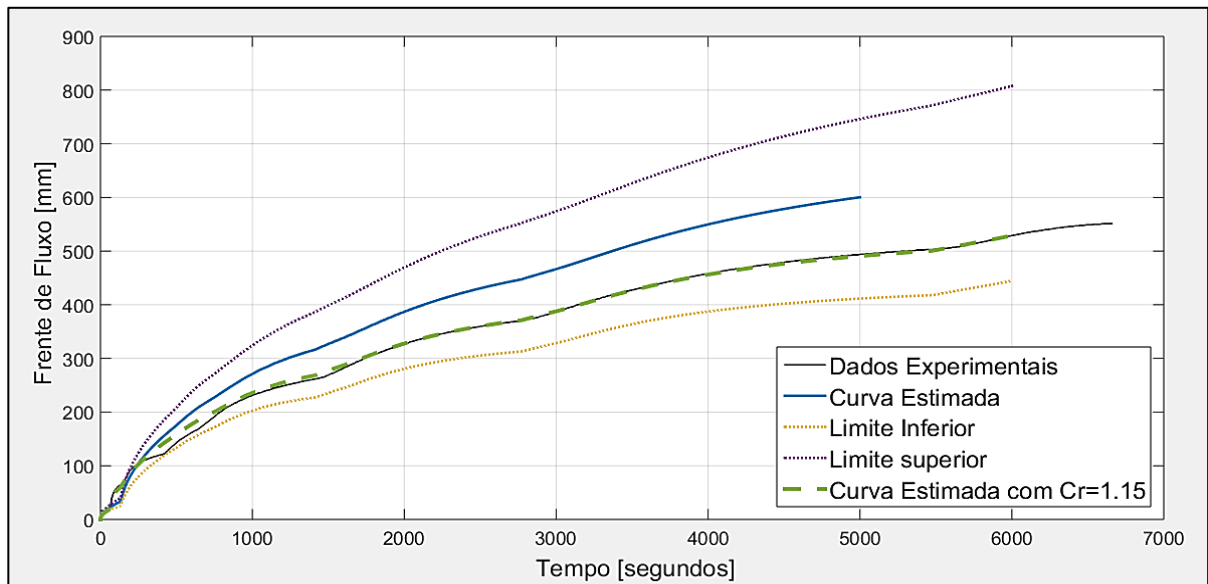


Gráfico 27 - Simulação do modelo da pressão à entrada da infusão (posição da frente de fluxo)

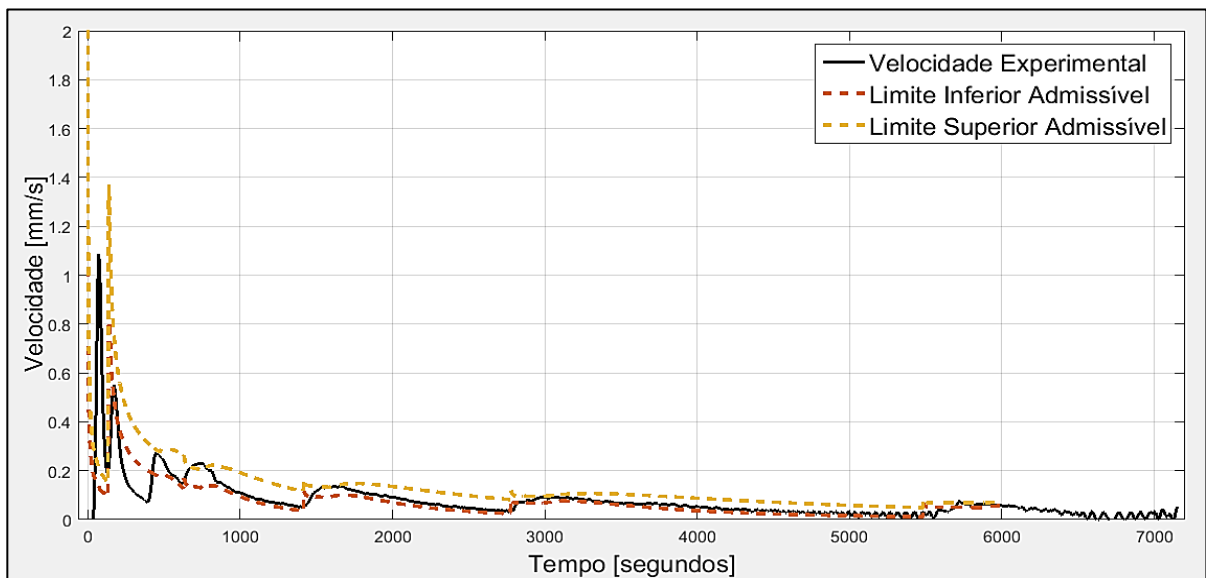


Gráfico 28 - Simulação do modelo da pressão à entrada da infusão (velocidade)

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO E PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Este projeto teve como principal objetivo a modelação dinâmica de um processo de infusão a vácuo. No entanto, outras temáticas foram abordadas no decorrer dos trabalhos, nomeadamente, projetar e construir o sistema laboratorial de infusão a vácuo, onde se vieram a realizar os testes experimentais.

Do ponto de vista da instrumentação este trabalho foi bastante exigente. São vários os sistemas auxiliares, sendo os de maior relevo, o sistema de leitura de pressões, o sistema de controlo das electroválvulas e o sistema de visão artificial. No entanto, este último destaca-se dos demais, devido à sua complexidade computacional e à grande importância que apresenta na modelação dinâmica. Num sistema desta natureza, o controlo da luminosidade é essencial, e encontrar solução para este problema pode ser bastante difícil. Se, por um lado, a escolha do corante é importante para que não ocorra filtragem no meio fibroso, por outro, o controlo dos reflexos de luz é fundamental para não saturar algumas zonas da imagem.

Após a conceção de todos os subsistemas foi criada a interface gráfica que, embora não seja um sistema físico, funciona como elemento de supervisão e controlo de todos os subsistemas. São vários os conhecimentos necessários para a sua implementação, nomeadamente sobre protocolos de comunicação, visto que na sua estrutura está incluído todo o processo de comunicação com os sistemas periféricos.

Acompanhado de testes experimentais, o processo de modelação começou logo de seguida, iniciando-se também os estudos analíticos subjacentes. A primeira modelação realizada foi de uma infusão com pressão de entrada constante, cujos resultados se mostraram, desde logo, positivos e motivadores. A modelação seguinte foi de uma infusão com pressão de entrada variável, evidenciando-se desde cedo uma certa dificuldade, devido ao comportamento não linear do processo. Esta foi uma das temáticas mais desafiantes do trabalho, especialmente por se tratar de um assunto praticamente desconhecido na literatura da especialidade.

Para a obtenção do modelo global de um processo de infusão a vácuo com variação da pressão de entrada, dividiu-se o problema em três etapas: modelação do escoamento unidirecional (lei de *Darcy*), modelação da pressão à entrada da infusão (atuação das válvulas) e modelação da pressão à entrada das válvulas, por atuação dos subsistemas de controlo auxiliares (altura dos reservatórios e inclinação da mesa). Para a modelação do escoamento foram estudadas algumas propostas, sendo o modelo que engloba o campo pressões não linear e o efeito de capilaridade, o que melhor descrevia os fenómenos físicos. Na modelação da pressão à entrada da infusão, inicialmente foi observado que o comportamento da mesma, em função do estado de atuação das válvulas, apresentava-se próximo de uma evolução de primeira ordem. No entanto, as dinâmicas envolvidas aquando do fecho e abertura da válvula tinham diferenças evidentes; portanto, dividiu-se em dois submodelos, com constante de tempo distintas. Por fim, realizou-se a modelação da pressão à entrada das válvulas, que depende da atuação dos sistemas de variação da altura dos reservatórios e da inclinação da mesa. Devido à inexistência de dinâmicas de ordem superior, o resultado obtido em ambos os sistemas resume-se a modelos algébricos.

A modelação dinâmica foi concluída com a obtenção de mais dados experimentais, para validação do modelo global de uma infusão a vácuo. Os resultados foram positivos. No entanto, a qualidade de aproximação do modelo encontra-se fortemente dependente do carácter estocástico dos parâmetros relacionados com escoamento.

A continuidade do projeto depende essencialmente da perspetiva de evolução que apresenta. Por essa razão segue-se um conjunto de propostas a executar em trabalhos futuros.

Sistema Laboratorial de Infusão a Vácuo:

1. Aquisição da temperatura (câmara térmica)

Quando se adiciona o endurecedor, a cura da resina pode iniciar-se ainda no decorrer da infusão. Com esta medida pretende-se caracterizar corretamente o modelo de cura e viscosidade da resina.

2. Aquisição da pressão ao longo do escoamento (sensores de pressão)

O conjunto de dados obtidos neste trabalho não permite uma caracterização exata do campo de pressões entre a entrada e a frente de fluxo. Com o conhecimento da forma do campo de pressões será possível melhorar o modelo dinâmico aqui descrito.

3. Adição de um segundo eixo de rotação perpendicular ao existente

Possibilidade de controlo da forma da frente de fluxo do escoamento.

4. Controlador de pressão (on/off) nos reservatórios da resina

Aplicar vácuo nos reservatórios permite controlar a velocidade da frente de fluxo e manter a espessura em valores mínimos (peças leves e homogéneas).

5. Sistema de medição da espessura (câmaras stereo)

Possibilita o controlo de qualidade das peças infundidas e com os dados experimentais é possível melhorar o modelo dinâmico obtido.

Modelação Dinâmica:

1. Adicionar os fenómenos físicos desprezados nesta dissertação

Perda de carga entre o reservatório e a entrada da infusão. Efeito de utilização da camada de distribuição para aumento da velocidade de escoamento.

2. Melhorar estudos de variação

Realizar mais testes experimentais.

3. Escoamento bidirecional

Iniciar estudo do escoamento radial (duas dimensões).

Controlo:

1. Aplicação de vácuo nos reservatórios

Devido às vantagens que apresenta, apostar no controlo de velocidade através da aplicação de vácuo nos reservatórios.

2. Estrangulador fixo

Estudar a ideia de colocação de um estrangulador na entrada da infusão, de forma a auxiliar o controlo de velocidade.

REFERÊNCIAS

- ACMA. 2009. "Vacuum Infusion Process". *American Composites Manufacturers Association*. Last access: October 2015.
<http://www.acmanet.org/cct/cct-programs-main/2-uncategorized/145-events-education-certification-programs-cct-vacuum-infusion-process-vip>
- Alms, Justin B. 2010. "Flow Manipulation And Control Methodologies For Vacuum Infusion Processes". *ProQuest Dissertations And Theses*, Thesis (Ph.D.) University of Delaware. Volume: 72-04. Section: B. 257p.
- Alms, Justin B., Suresh G. Advani, Glancey, and James L. 2011. "Liquid Composite Molding Control Methodologies Using Vacuum Induced Preform Relaxation". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 42, Issue 1, 57-65
- Azevedo, Cesar R. F., and Beatriz A. Campos. 2007. "Metalurgia And Materiais." *M AND M*.
- Beckwith, Dr. Scott W. 2007. "Resin Infusion Technology: A Detailed Overview of RTM and VIP Infusion Processing Technologies". *SAMPE Journal*. Volume 43. Issue 4. 66-69.
- Bickerton, Simon, Stadtfeld, Hubert C., Steiner, Karl V. Advani, and Suresh G. 2001. "Design and application of actively controlled injection schemes for resin-transfer molding". *Composites Science and Technology*, Volume 61, Issue 11, August–September 2001. 1625-1637.
- Biron, Michel. 2013. "6 - Composites, In Thermosets and Composites (Second Edition)." *William Andrew Publishing*. Oxford. 299-473.
- Boisse, Philippe. 2015. "Advances in Composites Manufacturing and Process Design". *Woodhead Publishing*.
- Carbonbydesign. n.d. "Vacuum Infusion". Last access: October 2015.
<http://www.carbonbydesign.com/vip.html>.
- CompositesWorld. 2014. "Fabrication methods". Last access: October 2015.
<http://www.compositesworld.com/articles/fabrication-methods>.
- Correia, Nuno. 2004. "Analysis Of The Vacuum Infusion Moulding Process". PhD thesis. *University Of Nottingham*.
- D.S. Kim, M.A. Garcia, C.W. Macosko. 1998. "Using Mold Pressure Rise Data to Obtain Viscosity of Fast Polymerizing Systems." *International Polymer Processing*. Volume 13. 162-171.
- Gardiner, Ginger. 2012. "The evolution of infusion". Last access: October 2015.
<http://www.compositesworld.com/articles/the-evolution-of-infusion>.
- George, Andrew. 2011. "Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials: Simulation and Characterization Strategies". PhD thesis. *Institute of Aircraft Design-University of Stuttgart*.
- Heider, K.-T. Hsiao e D. 2012. "10 - Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in polymer matrix composites." *In Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering* Pages. Woodhead Publishing. 310-347.
- History of Composites. 2015. Last access: October 2015.
<http://www.mar-bal.com/applications/history-of-composites/>.
- INEGI. 2011. last access: September 2015. <http://www.inegi.up.pt/>.

- J.R. Hutchinson, P.J. Schubel, N.A. Warrior. Fevereiro 2011. "A cost and performance comparison of LRTM and VI for the manufacture of large scale wind turbine blades." *Renewable Energy*. Volume 36, Issue 2. 866-871.
- Johnson, Todd. 2015. "About Money". Last acess: September 2015.
<http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>.
- Kelly, Piaras A., Carl J. Johnson, and Don A. Nield. 2007. "Simulation Of Resin Infusion Process." *16th International Conference On Composite Materials*. Department of Engineering Science, The University of Auckland. 1-6.
- Li, Jing. 2006. "Modeling, Design And Control Of Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (Vartm) For Thickness Variation Reduction". *Electronic Theses, Treatises and Dissertations*. Florida State University. Paper 1440.
- Lomov, Stepan. 2014. "Textile modelling: Permeability". Last acess: October 2015.
https://www.mtm.kuleuven.be/Onderzoek/Composites/Research/meso-macro/textile_composites_map/textile_modelling/textile_modelling_permeability.
- Lubin, George. 2013. "Handbook of Composites". *Kluwer Academic Publishers Group* . Dordrecht, Netherlands. Springer Science & Business Media.
- Modi, Dhiren, Nuno Correia, Michael Johnson, Andrew Long, Christopher Rudd, and Francois Robitaille. 2007. "Active control of the vacuum infusion process." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Volume 38. Issue 5. 1271-1287.
- Mogavero, J., J. Q. Sun, and S. G. Advani. 1997. "A Nonlinear Control Method for Resin Transfer Molding." *Polymer Composites*. University of Delaware. 412-417.
- Moreira, Anabela Mendes. 2009. "Materiais Compósitos." *Escola Superior de Tecnologia de Tomar*. Departamento de Engenharia Civil.
- Nasseh, Jorge. 2007. "BARCOS - Métodos Avançados de Construção em Composites". Rio de Janeiro. Last acess: October 2015.
<http://www.manualdeconstrucaodebarcos.com.br/Site/wp-content/uploads/2011/12/bmacc.pdf>
- Navarro, R. F. 2006. "A Evolução dos Materiais. Parte1: da Pré-história ao Início da Era Moderna " *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. Volume 1. Issue 1. 01-11.
- Oliveira, Rafael, Luís Pina, and Fernando Silva. 2015. "Controlo Automático de Processos de Infusão a Vácuo-CAPIV-INEGI-D1." *LAETA*.
- Pascini, Rodrigo Liberatori. n.d. "Compósitos Poliméricos." *Universidade Federal do Paraná*. Setor de Recnologia, Curso de Engenharia Elétrica.
- Pollock, Paul. n.d. "Modest Beginnings". Last acess: September 2015.
<http://web-cars.com/corvette/1953-Corvette.php>.
- Potter, K.D. May 1999. "The early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Volume 30. Issue 5. 619-621.
- R. Arbtera, J.M. Beraudb. 2011. "Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Volume 42. Issue 9. 1157-1168.
- Scala, E. Pete. 1996. "A brief history of composites in the U.S.—The dream and the success." *JOM, Composite Historical Insight*. Volume 48. Issue 2. 45-48 .

- Schubel, Peter J. 2012. "Cost modelling in polymer composite applications: Case study – Analysis of existing and automated manufacturing processes for a large wind turbine blade." *Composites Part B: Engineering*. Volume 43. Issue 3. 953-960.
- Silva, Fernando. 2012. "Depósitos de Água." *Materiais de Construção Mecânica II*.
- Silva, Fernando, Rafael Oliveira, and Luís Pina. 2016. "Instalação e Afinação do Sistema Laboratorial CAPIV-INEGI-D2." *LAETA*.
- Song, Xiaolan. 2003. "Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification." PhD thesis. *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*.
- T.S. Mesogitis, A.A. Skordos, A.C. Long. 2014. "Uncertainty in the manufacturing of fibrous thermosetting composites: A review." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Volume 57. 67-75.
- Verneta, N., e E. Ruiza. 2014. "Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Volume 61. 172-184.